ETUDE SUR LES CHEMINS DE FER ATMOSPHÉRIQUES PAR J. DAIGREMONT

J. Daigremont







ETUDE

SUR LES

CHEMINS DE FER ATMOSPHÉRIQUES

par

J. DAIGREMONT

Directeur des Travaux et de l'Entretien aux Chemins de fer

de la Haute Italie.





TURIN

ETABLISSEMENT DE JOSEPH CIVELLI

1865

				ERRATA		CORRIGE
Pag.	37	ligne	17	(Fig. 2)	lisez	(Fig. 1)
»	38	»	11	$R(1+\rho)+F$	»	$R(i+\rho)+F$
»	45	»	18	$S+S''$	»	$S'+S''$
»	46	»	16	$\frac{1.^{k}30}{10^{k}.330}$	»	$\frac{1.^{k}30}{10330^{k}}$
»	47	»	21	$= mKS''' \sqrt{}$ ecc.	»	$= mKS'' \sqrt{}$ ecc.
»	59	»	15	20033 kilogrammètres	»	200 330 kilo-(grammètres

ETUDE

SUR LES

CHEMINS DE FER ATMOSPHÉRIQUES

On a fait depuis quelques années de grands efforts pour perfectionner la locomotive, c'est-à-dire pour la rendre capable d'aborder les pentes les plus prononcées et de s'engager dans les courbes du rayon le plus réduit.

Parmi les lignes accidentées que l'on est parvenu à exploiter régulièrement au moyen de machines d'un type spécial, nous citerons:

1.° La rampe des Giovi sur la ligne de Turin à Gênes: cette section a 9740 mètres de longueur et une pente moyenne de 0.^{m} 028 par mètre; l'inclinaison maximum atteint 0.^{m} 035 par mètre, et le rayon minimum des courbes est de 400 mètres.

2.° La traversée du Semmering, sur la ligne de Vienne à Trieste; le rayon des courbes y descend à 190 mètres et la pente s'élève à 0.^{m} 025 par mètre.

3.° La traversée provisoire des Montagnes Bleues (Etat de Virginie); l'inclinaison maxi-

mum est de 52 millièmes sur l'un des versants, de 56 millièmes sur l'autre; le rayon des courbes n'est en certains points que de 71.m 40. L'exploitation se fait avec des locomotives de 24 tonnes 1/2, remorquant en moyenne 43 tonnes.

4.° Une petite section, également provisoire, du chemin de Baltimore à l'Ohio, dont la pente atteint 0.m 10 par mètre, et sur laquelle un moteur du poids de 50 tonnes, remorque un convoi de 13 tonnes.

5.° Enfin la section récemment ouverte de Porretta à Pistoja, sur la ligne de Bologne à Florence; ce tronçon, de 40 kilomètres de longueur, présente des pentes presque continues de 0.m 025 par mètre, et une succession de courbes et contre courbes de 300 mètres de rayon; il est exploité par des locomotives Beugniot, qui pèsent 70 tonnes, tender compris, et utilisent 48 tonnes pour l'adhérence: ces puissants moteurs remorquent dans les conditions qui viennent d'être indiquées un convoi de 180 tonnes à la vitesse de 15 kilomètres à l'heure.

Ces nombreux essais tentés avec des machines des types les plus variés, ont permis aujourd'hui de déterminer d'une manière fort précise les bornes au delà desquelles les locomotives cessent de fonctionner dans des conditions normales et économiques, et où il convient de chercher à les remplacer par quelque autre moteur.

Ainsi, tandis que l'on parvenait, au moyen

de dispositions très ingénieuses, à éliminer complètement la difficulté du passage des machines dans les courbes de petit rayon, on a constaté que sur les lignes destinées à un certain trafic, l'inclinaison de 25 millièmes était un maximum qu'il n'était pas convenable de dépasser, que par exemple les pentes de 35 millimètres admises sur le plan incliné des Giovi, rendraient toujours fort dispendieuse l'exploitation de ce court tronçon; qu'enfin les rampes de 25 millimètres n'étaient elles-mêmes acceptables qu'à la condition de ne pas présenter un développement excessif.

Ces faits ne sont aujourd'hui contestés par personne, pas mêmes par les ingénieurs qui espèrent franchir avec la locomotive la chaîne des Alpes ou celle des Pyrénées, et c'est toujours la pente maximum de 25 millimètres qui est le point de départ des nombreux projets récemment étudiés pour traverser le S.t Gothard, le Luckmanier ou le Splügen, c'est-à-dire pour relier Gênes et la fertile plaine du Po au lac de Lucerne ou au grand bassin du lac de Constance. Malheureusement tous ces projets n'ont d'autre résultat que de constater à quel point la locomotive est impuissante à résoudre un pareil problème.

Malgré les ingénieux expédients mis en œuvre pour remonter avec des rampes de 25 millimètres des vallées dont la pente est trois ou quatre fois supérieure à ce chiffre, les différents tracés dont nous parlons aboutissent in-

variablement à un grand tunnel de douze ou quinze kilomètres à percer sous les Alpes, d'après la méthode actuellement suivie au Mont-Cenis. Or la valeur industrielle de cette solution, qui fait honneur au Gouvernement assez hardi pour l'accepter en l'absence de quelque procédé plus expéditif et plus économique, est aujourd'hui bien connue de tous les ingénieurs. On sait que le tunnel du Mont-Cenis, dont les travaux sont conduits avec la plus grande habileté, et qui traverse en général des roches d'une extraction facile, ne coûtera pas moins de 6000 francs le mètre courant, soit 73 320 000 francs pour une longueur de 12 220 mètres; en ajoutant à ce chiffre le compte des intérêts, comme il est indispensable de le faire, on arrive au total effrayant de cent millions de dépenses, soit six millions de rente, au taux le plus modéré.

Ce chiffre est déjà un sérieux obstacle à toute application nouvelle du système des grands tunnels; cependant une difficulté de cette nature pouvant toujours être levée par une subvention gouvernementale, la solution serait apte à entrer dans le domaine industriel, si une considération plus puissante, relative à la durée des travaux ne devait pas l'en exclure irrévocablement. Les partisans des grands souterrains reconnaissent eux mêmes que le percement d'un tunnel de 15 kilomètres de longueur comme on l'a projeté au S.t Gothard, n'exigera pas moins

de douze à quinze années de travail, en tenant compte du temps perdu pour les études et pour l'installation des appareils.

Toute société industrielle qui s'organisera pour construire et exploiter un passage des Alpes devra donc commencer par avertir le public que pendant quinze ans, ses actions ne toucheront qu'un intérêt fixe, prélevé, bien entendu, sur le capital lui-même; croit-on sérieusement qu'une pareille perspective soit de nature à assurer le placement de ces titres? ne préférera-t-on pas toujours des coupons de rente à des actions dont la valeur peut tomber à zéro, si le percement vient à être abandonné par suite de quelque circonstance imprévue? on pourrait, il est vrai, donner la concession du passage des Alpes à une société de chemins de fer déjà constituée, et qui se procurerait l'argent nécessaire aux travaux par des émissions d'obligations; mais ne voit-on pas que l'incertitude attachée au succès de l'entreprise aurait pour conséquence immédiate d'ébranler le crédit de cette compagnie, si puissante qu'elle fût, et d'amener la baisse de ses actions? aucune société sérieuse ne se lancera donc jamais dans des hasards semblables, et la remarquable entreprise du Mont-Cenis ne sera plus renouvelée par personne.

On nous permettra à ce sujet une dernière remarque: le percement des Alpes entre Bardonnèche et Modane est une œuvre si grandiose qu'on oublie volontiers toute autre difficulté en

présence de cette gigantesque barrière; on se figure donc aisément que sa suppression doit tout aussitôt ouvrir une voie facile au commerce international de la France et de l'Italie: malheureusement les chiffres viennent modifier cette opinion, en grande partie illusoire.

Le point culminant du tunnel est à 1338.m 00 au dessus du niveau de la mer, tandis que les cotes de S.t Jean de Maurienne et de Suse sont respectivement de 557 et de 501 mètres au dessus du même niveau; la hauteur à franchir sera donc de 781 mètres sur le versant français et de 837 mètres sur le versant italien, soit en tout 1618 mètres: cette énorme chûte sera rachetée entièrement au moyen de rampes d'une forte inclinaison et dont le maximum atteindra 0.m 03 et même, si nous ne nous trompons, 0.m 032 par mètre. Or, si la rampe des Giovi, située sous le ciel tempéré de la rivière de Gênes, et ne rachetant qu'une chûte de 271 mètres, constitue une charge dejà fort lourde pour l'exploitation de la grande artère qui rattache Gênes à Turin et à Milan, on se demande dans quelles conditions fonctionnera une ligne exposée à toutes les rigueurs du climat des Alpes, et présentant des rampes six fois plus importantes que celle des Giovi? (1)

(1) On nous reprochera peut-être de *totaliser* la chûte des deux versants des Alpes, au lieu d'en prendre la moyenne; mais il faut remarquer que le train qui use beaucoup de charbon à la remonte, use également beaucoup de fer et d'acier à la descente, et que cette partie on peut dire négative de la traction par locomotives, n'en est probablement pas la plus économique.

Enfin la traction des convois offrira de sérieuses difficultés dans l'intérieur même du tunnel, construit en pente de 0.m 0222 par mètre sur la moitié de sa longueur: la galerie de faîte des Giovi, longue de 3100 mètres et pourvue de trois puits d'aérage, est quelquefois tellement pleine de fumée qu'à plusieurs reprises des cantonniers sont tombés suffoqués sur la voie: la traction par locomotives ne sera donc possible dans le tunnel des Alpes qu'avec le secours d'une ventilation artificielle très-énergique, capable de renouveler plusieurs fois par jour les 500 000 mètres cubes d'air que renfermera la galerie: il est même fort probable que l'on se trouvera obligé de recourir à quelque autre mode de propulsion, et qu'après avoir sacrifié cent millions et près de vingt années à percer les Alpes, on en sera réduit, pour utiliser cet immense travail, à faire appel à quelque système nouveau, dont l'application sur une large échelle eut permis de passer promptement et économiquement par dessus la montagne, au lieu de s'enfoncer à grands frais dans ses profondeurs.

Quelques ingénieurs, convaincus de l'impossibilité économique de recommencer sur quelque autre passage des Alpes la coûteuse expérience du Mont-Cenis, ont prétendu conduire la locomotive, à force de lacets et de rebroussements, jusqu'au niveau même du col à franchir: c'est dans cet ordre d'idées qu'a été rédigé,

pour la traversée du Luckmanier, le projet de M.r Michel, qui s'élève au moyen de rampes de 30 millimètres, jusqu'à la cote de 1870 mètres, c'est-à-dire à 47 mètres seulement plus bas que le col lui-même, traversé au moyen d'un petit souterrain; malheureusement, si les projets de cette nature rendent possible et même assez économique la construction d'un passage des Alpes, l'impossibilité de l'exploitation au moyen de locomotives les a fait rejeter par tous les ingénieurs.

En résumé, il n'existe aujourd'hui aucun moyen vraiment pratique et industriel de franchir les grandes chaînes de montagnes; ce problème difficile ne peut être résolu que par l'application de quelque système entièrement nouveau: l'objet de cette étude est précisément de démontrer que le principe de la propulsion atmosphérique fournit une solution simple et économique de cette importante question.

Un ingénieur danois nommé Medhurst a déjà proposé, il y a plus de cinquante ans, de faire circuler dans l'intérieur d'un tube des véhicules chargés de marchandises: en faisant le vide à l'une des extrémités de la conduite, l'inégalité de la pression de l'air sur la tête et la queue du convoi, devait forcément déterminer sa marche: ce projet parut fort étrange et n'eut aucun succès.

C'est la même idée, reprise et assez malheureusement modifiée par d'autres inventeurs, qui

a produit les essais des chemins de fer atmosphériques de Kingstown à Dalkey en Irlande et de S.[t] Germain près de Paris.

Enfin plusieurs personnes se sont tout récemment occupées de la même question, en revenant toutefois à la disposition primitivement imaginée par Medhurst.

M.[r] Latimer Clarke a fait breveter en Angleterre, en 1854 et 1857, un système de poste atmosphérique, qui fonctionne aujourd'hui à Londres sur une échelle restreinte, mais d'une manière régulière. Les lettres et les paquets sont placés dans un chariot en fer porté sur quatre roulettes; ce chariot s'engage dans un tube en fonte de 0.^{m}75 de diamètre, dont il remplit assez exactement la section, afin d'éviter de trop grandes pertes d'air. Un ventilateur de l'invention de M.[r] l'Ingénieur Rammel lance dans le tube de l'air comprimé dont la pression chasse le chariot jusqu'à l'extrémité de la conduite. Le retour s'effectue d'un manière inverse: on met en communication le tuyau de prise d'air du ventilateur avec la conduite en fonte, et il s'opère dans celle-ci une raréfaction qui détermine la marche rétrograde du chariot.

M.[r] Berrens, Ingénieur en chef de la Voie aux chemins de fer Lombards, a publié de son côté, en juin 1861, un mémoire intitulé: *Traversée des montagnes avec l'air comprimé dans des tunnels métalliques;* l'auteur propose de franchir les chaînes de montagnes au moyen

de tubes en tôle de 2.m 85 ou de 4.m 50 de diamètre, présentant une pente maximum de 0.m 10 par mètre: la grande section permettrait de faire circuler dans le tunnel tous les véhicules en usage dans les chemins de fer; la petite section beaucoup moins chère à établir, exigerait l'adoption d'un matériel spécial et un double transbordement des personnes et des marchandises à l'entrée et à la sortie du tube. Voici, dans tous les cas, comment M.r Berrens obtient le mouvement des convois dans son système: on place en queue de chaque train montant un piston propulseur qui occupe aussi exactement que possible la section entière du tunnel; on engage le train ainsi composé dans le tube, dont la porte d'entrée est aussitôt fermée: puis on introduit derrière le piston de l'air comprimé par de puissantes machines et doué d'une tension suffisante pour déterminer l'ascension du convoi: une fois celui-ci parvenu au point culminant du col à franchir, on l'arrête sur un palier ménagé à cet effet, et l'on place le piston en tête: on ferme la porte du tunnel placée en bas de la pente que l'on se propose de descendre, et on engage le train sur cette pente, où son propre poids tend à lui communiquer une vitesse croissante; mais comme à mesure qu'il avance, il comprime de plus en plus la colonne d'air comprise entre le piston et la porte de sortie, il s'arrêterait promptement, si le mécanicien en manœuvrant une vanne pla-

cée dans la paroi du piston propulseur, ne réglait pas à volonté sa vitesse en laissant échapper une quantité plus ou moins grande d'air comprimé.

Tel est en résumé le système de M.r Berrens, système dont le principal inconvénient consiste dans le prix de revient très-élevé du tunnel et qui d'un autre côté n'a pas été étudié par l'inventeur avec assez de détail pour entrer sans recherches nouvelles dans le domaine de la pratique.

Un Ingénieur italien a proposé, à peu près à l'époque où M.r Berrens publiait le résultat de ses études, de franchir les grandes chaînes de montagnes au moyen de deux tubes accolés, disposition ayant pour objet de faire servir le poids des trains descendants à l'ascension des trains montants; idée ingénieuse, sans doute, mais peu pratique ainsi que le prouveront les calculs exposés plus loin.

Un Ingénieur anglais, M.r Edwards, s'est également occupé et s'occupe encore aujourd'hui du système atmosphérique: un modèle de son appareil existe et fonctionne à Turin à la station de Porta Susa: nous aurons occasion d'en parler dans le cours de cette étude.

Il parait enfin que M.r Rammel, qui a inventé le ventilateur en usage à la poste atmosphérique de Londres, s'occupait dès l'année 1860 d'appliquer en grand le même mécanisme aux chemins de fer à fortes pentes. Cet Ingénieur

vient avec le concours de plusieurs autres personnes de faire l'essai de son système dans les jardins du palais de cristal de Sydenham, près de Londres.

Le tunnel construit à titre d'expérience est en maçonnerie de briques; sa section circulaire a 3.m 20 de diamètre; sa longueur est de 548 mètres; on y a ménagé sur une étendue de 60 mètres une pente de $^1/_{15}$ème, rachetant ainsi une différence de niveau totale de 4.m 00: une autre portion du souterrain est en courbe de 160 mètres de rayon.

Un wagon pouvant contenir trente à quarante personnes, et muni d'un écran d'une section un peu inférieure à celle du tube, se meut alternativement dans un sens ou dans l'autre par l'action d'un grand ventilateur qui produit à volonté la compression ou la raréfaction de l'air renfermé dans le tunnel; cette disposition ne fait du reste que reproduire sur une échelle plus grande la solution déjà appliquée à la poste atmosphérique.

Le petit chemin de Sydenham fontionne depuis le mois d'août 1864: il est journellement parcouru par un grand nombre de curieux, et n'a jamais donné lieu à aucun accident.

Tel est en résumé l'état actuel de la question des chemins de fer atmosphériques, question qui a bien changé d'aspect depuis l'abandon du coûteux essai de S.t Germain.

On se rappelle en effet que le tube atmosphé-

rique de S.t Germain, placé dans l'axe de la voie, n'avait qu'un diamètre intérieur de 0.^{m}63, et par conséquent une section de 0.$^{m.q}$ 30. Ce tube étant fendu dans toute sa longueur afin de rendre possible la liaison du piston propulseur avec le train placé au dehors, le vide qu'on y produisait ne dépassait pas en pratique une demi-atmosphère, en raison des rentrées d'air par la soupape longitudinale; l'effort de traction dont on pouvait disposer était ainsi limité à 1500 kilogrammes environ, tandis que les locomotives en service sur la ligne de Pistoja développent un effort de traction de 7500 kilogrammes, c'est-à-dire quintuple du précédent; le système de S.t Germain manquait donc de puissance, et son abandon était la conséquence logique et inévitable de la force croissante des machines locomotives.

On pourrait il est vrai corriger cet inconvénient du tube de S.t Germain soit en augmentant son diamètre, soit plutôt en remplaçant l'air raréfié par l'air comprimé et en portant la tension de celui-ci à plusieurs atmosphères. Mais cela ne remédierait pas au vice radical du système, c'est-à-dire aux fuites par la soupape longitudinale; défaut tellement grave, que M.r Eugène Flachat, auteur de l'expérience de S.t Germain, conseillait en cas d'application nouvelle de ne pas espacer de plus de trois kilomètres les machines destinées à la production du vide.

Enfin il ne faut pas oublier que le tube en

fonte de S.t Germain coûtait à lui seul 200 000 francs par kilomètre, et que si l'on se proposait de construire un tube de même section capable de résister, malgré sa fente longitudinale, à une pression intérieure de plusieurs atmosphères, on en serait sans aucun doute détourné aussitôt par le chiffre élevé de la dépense.

Tous ces inconvénients, ces impossibilités mêmes disparaissent dès que l'on adopte le principe des tubes à grande section mis en avant par M.r Berrens.

L'hypothèse d'un transbordement des marchandises à l'entrée et à la sortie du tunnel nous paraissant inadmissible, nous supposons que le tube aura un diamètre da 4.m 60, suffisant pour livrer passage à tous les échantillons de matériel roulant en usage sur les chemins de fer; ce diamètre correspond à une section de 16.m.q 60 et la valeur de la pression atmosphérique sur une pareille surface est de 170 000 kilogrammes: il suffira donc d'opérer dans le tube une compression, ou une raréfaction d'un dixième d'atmosphère seulement pour obtenir un effort de traction de 17 000 kilogrammes: effort suffisant pour mettre en marche un train de 200 tonnes sur une pente de 0.m 08 par mètre; si l'on pousse la compression à un huitième d'atmosphère, on pourra porter à 250 tonnes le poids du train sans changer la pente, ou inversement porter l'inclinaison à 0.m 10 par mètre sans modifier le poids du convoi.

Ces exemples font voir que la puissance du système atmosphérique est pour ainsi dire illimitée: sans doute l'air comprimé n'est qu'un agent destiné à transmettre commodément au train le travail mécanique produit par une machine fixe, et la remonte d'un convoi pesant sur un plan fortement incliné exigera toujours en définitive une énorme force motrice; mais c'est ici qu'apparait un des grands avantages du remplacement des locomotives par les machines fixes, car c'est toujours au pied des cols principaux que l'on peut se proposer de franchir, que les eaux des torrents se rassemblent en plus grande abondance, et il est bien rare que l'on ne puisse, au moyen d'aménagements convenables, se procurer à la partie inférieure de ces passages toute la force motrice nécessaire à la propulsion des convois.

A ces précieux avantages vient se joindre la sécurité absolue de la descente des trains: la colonne d'air que le wagon-disque placé en tête du convoi refoule devant lui, fait l'office d'un puissant ressort dont le mécanicien peut à chaque instant par la simple manœuvre d'une vanne, faire varier à son gré la tension; la descente s'opère sans secousses, sans l'intervention de freins qui ruinent la voie et le matériel roulant tout en exigeant la présence d'un personnel nombreux et exercé: le système dont M.r Berrens a posé les bases est donc encore inattaquable sous ce rapport.

Mais on a fait aux grands tubes en tôle le reproche très-fondé d'exiger d'énormes frais d'établissement: c'est là évidemment le côté défectueux du système Berreus: dans l'industrie une solution n'est jamais bonne quand elle est chère; or un tube en tôle ne pourrait pas rester partout à découvert dans les hautes régions des Alpes; les blocs de rochers qui se détachent incessamment des flancs des montagnes, les neiges que le vent amoncèle en certains points sur quinze à vingt mètres de hauteur, enfin les avalanches qui rasent les forêts sur leur passage, le détruiraient en peu de temps: un pareil tube devrait donc être protégé lui-même dans tous les points menacés, par des voûtes en maçonnerie, c'est-à-dire par un deuxième tube. Dès lors ne vaut-il pas mieux supprimer l'enveloppe métallique et faire circuler les trains dans un simple tube en maçonnerie, c'est-à-dire dans un tunnel ordinaire?

Cette substitution de la maçonnerie au métal rend certainement plus difficile la construction du piston propulseur, mais elle peut seule faire entrer le système atmosphérique dans le domaine de l'industrie, en lui donnant, au point de vue de l'économie de la construction, les avantages dont il est évidemment pourvu en ce qui concerne l'exploitation.

La solution du problème devient alors complète, et l'on en a une preuve si l'on rapproche les éléments d'un passage du Luckmanier dans

le système atmosphérique des données du projet très économique étudié par M.r Michel pour le même passage; voici cette comparaison, résumée en quelques chiffres:

Chemin atmosphérique (d'Aquila à Dissentis)

Longueur de tube sur le versant Sud.	11 500m.
id. id. sur le versant Nord.	5 500
Section à exploiter au moyen de locomotives entre les deux tubes, et á couvrir dans la majeure partie de sa longueur, (indépendamment des portions en souterrain), par des voûtes, ou par des toitures en tôle	17 000
Longueur totale à construire. .	34 000m.

Projet Michel (d'Aquila à Dissentis)

Longueur réunie de 20 galeries. .	5 543m.
Voûtes contre les avalanches . .	900
Parties à protéger par des toitures en tôle	20 000
Longueur totale des sections couvertes	26 443m.
Portions de ligne à découvert . .	44 857
Longueur totale. .	71 300m.
Longueur dans le système atmosphérique.	34 000
Différence. .	37 300m.

Il n'est pas nécessaire de dresser une estimation comparative de ces deux projets pour reconnaitre que les 34 kilomètres de chemin atmosphérique coûterent moins cher que 71 kilomètres d'une ligne qui devra être voûtée ou couverte d'une façon quelconque sur plus de 26 kilomètres: et comme le projet Michel est le plus économique de tous ceux qui aient jamais été dressés dans le but de réunir la Suisse à l'Italie, on voit que le système de la propulsion atmosphérique dans des tunnels en maçonnerie se trouve dans les meilleures conditions possibles eu égard aux frais de premier établissement.

Les chiffres qui viennent d'être cités permettent aussi de répondre à une objection qu'on a faite bien souvent aux chemins atmosphériques, en les comparant à des tuyaux où les voyageurs parcourront sans air ni lumière un nombre indéfini de kilomètres.

D'abord tout tuyau de 4.^{m}60 de diamètre mérite le nom de tunnel: en second lieu le *metropolitan-Railway* de Londres a prouvé qu'en éclairant convenablement les voitures, on pouvait faire accepter très facilement du public un transport souterrain: quant à l'air respirable on calculera plus loin que les fuites autour du wagon-disque en fourniront à elles seules environ 15 mètres cubes par seconde, quantité trente ou quarante fois supérieure aux besoins des voyageurs que chaque train pourra transporter: ajoutons que cet air sera parfaitement

pur, circonstance qui est loin de se produire dans nos grands tunnels de chemins de fer.

Enfin le plus long des deux tubes atmosphériques du Luckmanier n'a que 11 500 mètres de développement: peut-être même y aurait-il lieu en pratique, de diviser cette longueur en deux sections; mais en admettant qu'on en fit rien, il ne serait pas plus désagréable de parcourir 11 $^1/_2$ kilomètres dans un tunnel à fleur de sol, que d'en franchir 12 dans les profondeurs du Mont-Cenis.

Dans tous les autres passages des Alpes, les tubes seraient encore plus morcelés qu'au Luckmanier et aucun d'eux n'aurait plus de 9 kilomètres de longueur: ainsi tombe d'elle même l'objection assez futile dont nous avons dû parler parcequ'elle a été faite par un grand nombre de personnes.

Certains ingénieurs prétendent aussi qu'il sera impossible de rendre étanche un tube en maçonnerie de huit à dix kilomètres de longueur, et par conséquent de maintenir la pression dans ce tube; cette objection nous parait entièrement dénuée de fondement, car tous les tubes que l'ou pourra avoir à construire seront invariablement assis sur le rocher, circonstance qu'explique suffisamment les pentes de 0.^{m}08 à 0.^{m}10 par mètre sur lesquelles ces tubes seront établis : on n'aura donc pas à craindre des tassements dans la construction: les tubes étant toujours placés en déblai, et recouverts de plusieurs mètres de terre,

afin de mieux échapper aux avalanches et aux éboulements de rochers, se ressentiront très peu des variations de température qui sont la cause la plus ordinaire des disjonctions des maçonneries bien faites; il est d'ailleurs facile de se convaincre que les maçonneries des grands souterrains sont exemptes des crevasses qui se produisent presque toujours dans les maçonneries des grands ponts ou des grands viaducs. Ainsi les tubes maçonnés ne présenteront pas de fissures s'ils sont établis avec les précautions voulues: si c'est la porosité de la maçonnerie que l'on redoute, si l'on craint de voir l'air filtrer par les imperceptibles gerçures qui existent dans le travail le plus soigné, il sera bien facile d'y porter remède en appliquant sur la surface intérieure des galeries un enduit gras quelconque, bien suffisant pour maintenir une pression d'un dixième ou d'un huitième d'atmosphère au plus, pression correspondante à une charge d'eau d'un mètre ou d'un mètre vingt centimètres de hauteur.

Les différentes objections qui viennent d'être passées en revue, et que l'on oppose fréquemment au système atmosphérique, ne s'appuient donc sur aucun argument solide; mais il en est d'autres qui sont plus inquiétantes, et qu'il importe d'examiner avec soin.

Ainsi l'air comprimé qu'on lancera à l'entrée du tunnel n'agira sur le bouclier placé à l'arrière du train que par l'intermédiaire d'une co-

lonne d'air d'une longueur d'autant plus grande que le convoi sera plus éloigné de son point de départ: cette colonne d'air, agissant comme un ressort, pèsera moyennement 22 kilogrammes par mètre courant de galerie, soit 22 tonnes par kilomètre; le tunnel pouvant en certains cas avoir une longueur de 12 kilomètres sur un même versant, il en résulte que le poids du ressort servant à refouler le train atteindra quelquefois le chiffre de 260 tonnes, très notablement supérieur au poids du train lui même.

Il y a donc lieu de rechercher très attentivement si le mouvement de progression à imprimer à la colonne d'air renfermée dans le tunnel n'absorbera pas une grande quantité de force motrice. On aura également à examiner quelle sera l'intensité du frottement de cette même colonne contre les parois du tube et quelle perte de force pourra en résulter; les essais de Sydenham n'ont pas été entrepris sur une assez grande échelle pour fournir la solution expérimentale de ces problèmes; mais on verra plus loin qu'il est facile de les résoudre complètement par le calcul.

Le petit chemin de fer du Palais de cristal ne permet pas non plus d'étudier d'une façon satisfaisante la difficulté la plus grande des chemins atmosphériques, nous voulons parler des fuites d'air au pourtour du bouclier. Le poids du véhicule qui sert aux expériences de Sydenham.

ne parait pas dépasser 10 tonnes, voyageurs compris, et d'après les journaux anglais, la compression de l'air derrière le piston ne va pas au delà de 2 onces par pouce carré, soit 88 kilogrammes par mètre carré, tandis que sur les chemins destinés à une exploitation sérieuse, le poids des trains devra s'élever à 200 tonnes et la compression de l'air à 1000 et même 1200 kilogrammes par mètre carré: rien ne prouve donc que les fuites d'air, admissibles sous une faible pression, ne deviennent pas sous une pression dix à quinze fois plus forte un obstacle invincible à l'application du système: c'est là, il faut le reconnaître, la principale difficulté des chemins pneumatiques: un tunnel de 4.^{m}60 de diamètre et de 10 kilomètres de longueur ne peut pas être traité comme le cylindre d'une machine à vapeur en contact parfait avec le piston qui s'y meut. Il est indispensable, tant à cause des irrégularités que pourront présenter les parois du tube qu'en raison des mouvements de lacet du bouclier, de laisser un certain jeu entre le pourtour de ce disque et la surface du tunnel; or il est à craindre qu'un jeu trop considérable n'occasionne d'énormes déperditions de force, et qu'un jeu trop faible ne donne lieu à des chocs capables de disloquer en peu de temps les parois de la galerie.

A Sydenham on a pris le parti de laisser un vide de 0.^{m}05 à 0.^{m}06 entre l'écran et le tunnel en briques, et l'on a garni une partie de

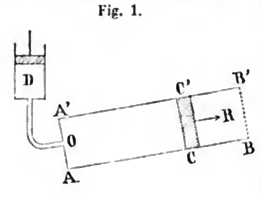
cet intervalle avec une brosse en crin faisant saillie de 0.^{m}04 environ sur l'écran: cette précaution s'est trouvée suffisante à cause du faible poids du véhicule refoulé par l'air comprimé et de la longueur minime de la rampe de $^1/_{15}$^{ème}, que le wagon d'essai peut très facilement franchir par sa seule vitesse acquise; le calcul fera voir qu'il en serait tout autrement sur de longues rampes, avec des trains pesants nécessitant une forte compression d'air. On s'est proposé dans l'étude qui va suivre d'examiner une à une toutes les questions que soulève l'application du système pneumatique aux chemins de fer et qui viennent d'être passées rapidement en revue: un premier chapitre a été consacré à la solution théorique des différents problèmes énumérés plus haut, et comprend toutes les formules mathématiques relatives à la propulsion par l'air comprimé; dans la seconde partie, on a cherché, en s'appuyant sur les résultats fournis par le calcul à indiquer les dispositions générales qu'il conviendra d'adopter dans la construction du tube, du bouclier et des machines soufflantes.

CHAPITRE PREMIER.

Calculs relatifs au jeu de l'air comprimé considéré comme moteur dans les chemins de fer atmosphériques (1).

Soit R (*Fig.* 1.) un train placé dans l'intérieur d'un tube incliné *AA' BB'* et refoulé par la pression d'une colonne d'air comprimé sortant du cylindre D; les résistances à vaincre pour déterminer le mouvement de progression du convoi se composeront: du produit du poids du train par la pente du tube; du frottement de roulement des véhicules formant le train; du frottement accidentel du bouclier CC' contre les parois du tube; du poids de l'air à refouler, tant dans la partie BB'CC' que dans la partie AA'CC' du tunnel; du frottement que cet air exercera en s'écoulant sur les parois de la galerie.

Fig. 1.



Il faudra de plus tenir compte des fuites d'air au pourtour du bouclier CC' et de celles qui

(1) Les principaux résultats des calculs qui suivent seront résumés au commencement du chapitre 2ème: on peut donc omettre à la rigueur la lecture du chapitre 1er.

pourront se produire à travers les parois mêmes du tube ou par la porte d'entrée mobile AA'. Le calcul de toutes ces résistances et de ces pertes d'air donnera l'expression du travail moteur à produire au point O, c'est-à-dire au point d'introduction de l'air comprimé dans le tunnel: enfin la puissance des machines soufflantes nécessaires à la propulsion sera déduite de cette expression augmentée de toutes les pertes inhérentes à ces machines elles-mêmes, et du travail préliminaire dépensé pour communiquer à l'air puisé dans l'atmosphère et renfermé dans le cylindre D, une tension capable de déterminer son introduction dans le tube.

Nous nous occuperons d'abord de la partie du calcul se rapportant au poids de l'air qui s'élève dans le tunnel devant et derrière le piston.

Si l'on considère une colonne verticale d'air sec, à une température constante qu'on supposera être celle de la glace fondante; si l'on désigne par P la tension de cet air en un point quelconque de la colonne, par Δ le poids spécifique du même gaz correspondant à la dite pression; par p la tension de l'air en un second point placé à une hauteur h au dessus du premier, on aura

$$\log \text{hyp} \frac{p}{P} = - \frac{\Delta h}{P}$$

d'où l'on tire

$$\text{Log}\, p = \text{Log}\, P - 0.43409 \frac{\Delta h}{P}$$

Il est à remarquer que, pour une même température, $\frac{\Delta}{P}$ est une constante, en vertu de la loi de Mariotte; le rapport $\frac{p}{P}$ ne dépend donc que de la hauteur h et la formule indique que quand cette hauteur croît en progression arithmétique la pression décroît en progression géométrique.

Lorsque la pression atmosphérique atteint le chiffre de 10 330 kilogr. et que la température de l'air est égale à zéro, son poids spécifique est de $1.^{k}30$; le rapport constant $\frac{\Delta}{P}$ a donc pour expression numérique $\frac{1.30}{10330} = 0.000126$.

Si l'on introduit cette valeur dans l'équation précédente, on a

$$(1) \qquad \text{Log}\, p = \text{Log}\, P - 0.054629\, H$$

la hauteur H étant ici exprimée en kilomètres. Soit par exemple $H = 1$, $P = 10\,330^{k}$; on trouvera $p = 9109$ kilogrammes; d'où

$$\frac{P - p}{p} = 0.134$$

En d'autres termes, si l'on considère deux stations situées à mille mètres de distance verticale, la pression atmosphérique de la station

inférieure dépassera de 13.40 % celle de la station supérieure. On voit que cette différence est considérable et qu'il y aura toujours lieu, dans la solution des problèmes qui se rattachent aux chemins atmosphériques de déterminer au moyen de la formule (1) les pressions barométriques au pied et au sommet de la rampe à franchir; mais on pourra admettre ensuite, sans aucun inconvénient pratique, que la tension de l'air varie entre ces deux points extrêmes, suivant une progression arithmétique; en supposant que la différence de niveau de ces deux points ne dépasse pas mille mètres, hypothèse déjà fort large, l'erreur que l'on commettra, en substituant ainsi une progression arithmétique à la progression géométrique qui représente la véritable loi de décroissance des pressions, sera toujours inférieure aux deux millièmes de la valeur des dites pressions.

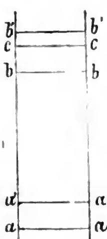
La formule deviendrait beaucoup plus compliquée si l'on faisait varier la température de l'air dans les différents points de la colonne envisagée, mais cela n'aurait que peu d'importance en pratique, et d'ailleurs il est probable que dans l'intérieur d'un tube qui sera généralement placé sous terre et sans cesse parcouru par un courant d'air provenant de la station inférieure la température sera sensiblement constante.

Comme cet air, en débouchant par l'orifice supérieur du tube sera toujours plus chaud

que l'atmosphère où il pénétrera, il en résultera, disons-le en passant, un tirage assez énergique, favorable à la propulsion; nous négligerons cet effet, dont l'intensité changera trop fréquemment pour qu'on en puisse tenir compte.

Tout ce qui vient d'être dit d'une colonne d'air verticale s'applique évidemment à une colonne d'air inclinée, de pente constante ou non; quelque soit le cas que l'on envisage, la pression ne variera d'un point à un autre qu'en raison de la différence de niveau existant entre ces deux points. Cela posé, soit *aabb* (*Fig. 2.*) une colonne d'air verticale plongée dans l'atmosphère, et animée d'un mouvement ascensionnel uniforme; il est aisé de démontrer que la conservation de ce mouvement n'exige l'intervention d'aucune force motrice étrangère.

Fig. 2.



Appelons en effet P la pression, et Δ le poids spécifique de l'air en *aa*, p et δ les quantités analogues en *bb*; soit $ab = h$. Si l'on admet qu'au bout d'un instant très court la colonne *aabb*, se soit transportée en *a'a'b'b'*, et que l'on désigne *aa'* par dl, on aura forcément

$$bb' = \mathrm{d}l \, \frac{\Delta}{\delta} = \mathrm{d}l \, \frac{P}{p}$$

car, la distribution des pressions dans les diffé-

rentes couches de l'atmosphère étant invariable, le volume de gaz renfermé dans l'espace *a'a'bb* doit avoir le même poids, soit qu'il fasse partie de la colonne primitive *aabb*, soit qu'on le considère comme portion intégrante de la dite colonne transportée en *a'a'b'b'*; et le poids total de la colonne ne pouvant changer, il en resulte que la tranche *aaa'a'* doit peser précisément autant que la tranche *bbb'b'*: ces deux tranches, ayant une même base, doivent donc avoir des hauteurs inversement proportionnelles à leur poids spécifique.

On déduit de là que le travail résistant $p \times s \times bb'$ de l'air refoulé à la partie supérieure de la colonne (dont on suppose la section égale à s) est égal au travail moteur produit par l'air qui presse le bas de la même colonne et qui a pour expression $P \times s \times aa'$: l'égalité de ces deux valeurs peut surprendre au premier abord, car il est manifeste que dans le déplacement de la colonne *aabb* en *a'a'b'b'*, chaque molécule d'air s'est élevée d'une certaine quantité, ce qui a dû exiger un certain travail. Or la somme de ces différents travaux élémentaires peut être obtenue en admettant que toute la masse de gaz *a'a'bb* soit restée en repos, pendant que la tranche *aaa'a'* s'élevait de la hauteur h en *bbb'b'*. Cette somme a donc pour expression

$$S \Delta dl \times h, \qquad (2)$$

mais d'un autre coté, chaque tranche d'air s'est

détendue en s'élevant et a produit ainsi un certain travail moteur, dont le total est précisément égal à l'expression (2), ainsi qu'il est facile de le démontrer.

La somme des travaux élémentaires produits par la détente de chaque tranche ne subirait en effet aucune altération si l'on supposait que la masse gazeuse *a'a'bb* demeurât immobile et que la tranche *aaa'a'* transportée en *bbcc*, pût seule se détendre jusqu'à occuper tout l'espace *bbb'b'*: cherchons par conséquent l'expression de ce dernier travail.

Soit en général P la pression d'un gaz renfermé dans un cylindre de base S et de longueur γ; on suppose que ce gaz se détende jusqu'à occuper dans le cylindre une longueur γ', et l'on demande quel sera le travail produit par la détente.

Au moment où le gaz se sera dilaté de manière à occuper une longueur comprise entre γ et γ' et que nous désignerons par λ, sa pression sera $\frac{P\gamma}{\lambda}$, et le travail élémentaire produit par son expansion dans un moment très court aura pour expression

$$SP\gamma\frac{d\lambda}{\lambda}$$

Le travail total sera donc égal à

$$SP\gamma\int_{\gamma}^{\gamma'}\frac{d\lambda}{\lambda}=SP\gamma\log\text{hyp}\frac{\gamma'}{\gamma}$$

en appliquant cette formule générale au cas particulier qui nous occupe, c'est-à-dire en faisant $\gamma = \mathrm{d}l, \frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{bb'}{aa'} = \frac{P}{p}$ on trouvera que le travail cherché est égal à

$$S\ P\ \mathrm{d}l \log \mathrm{hyp} \frac{P}{p}$$

Il est facile de voir que cette valeur est parfaitement égale à l'expression (2) et que l'on a par conséquent

$$S\ \Delta\ \mathrm{d}l\ h = S\ P\ \mathrm{d}l \log \mathrm{hyp} \frac{P}{p}$$

ou bien

$$\log \mathrm{hyp} \frac{P}{p} = \frac{\Delta h}{P},$$

car cette équation est précisément celle qui nous a servi de point de départ, et qui exprime la loi des variations de la pression atmosphérique en fonction de la hauteur.

Ainsi dans une colonne d'air animée d'un mouvement ascensionnel uniforme l'expansion progressive du gaz produit exactement le travail moteur nécessaire pour vaincre le travail résistant de la pesanteur ; or comme nous avons prouvé précédemment qu'il y avait aussi égalité entre le travail moteur et le travail ré-

sistant des pressions extérieures agissant sur la colonne, il suit de là, en négligeant, bien entendu, les frottements développés par l'air en mouvement, que le déplacement de bas en haut d'une colonne d'air renfermée dans un tube vertical ouvert par les deux bouts, n'exige l'intervention d'aucune force motrice étrangère et que ce mouvement, une fois commencé, doit continuer par le seul jeu des pressions atmosphériques.

Le même principe serait également vrai, si au lieu d'une colonne d'air verticale on considérait une colonne inclinée.

Ainsi, le refoulement de la colonne d'air à la pression atmosphérique que le bouclier chassera devant lui dans l'intérieur du tunnel, n'exigera aucune consommation de force motrice: ou du moins la seule résistance à vaincre sera le frottement de cette colonne sur les parois du tube, frottement dont on s'occupera un peu plus loin: c'est là une circonstance très heureuse, car on a vu plus haut qu'un tunnel de 12 kilomètres de longueur renfermerait un poids d'air de 260 tonnes environ et si cette masse avait exercé une résistance analogue à celle du train lui-même, la propulsion atmosphérique devenait par ce seul fait d'une application très coûteuse et par conséquent très problématique.

Il s'agit maintenant de voir si le refoulement de la colonne d'air comprimé, comprise entre l' extrémité inférieure du tunnel et le

bouclier, s'opérera dans des conditions aussi avantageuses que celles de la colonne d'air supérieure.

Soit *aabb* (*Fig.* 3.) une colonne d'air verticale renfermée dans un tube et comprise entre deux disques *aa*, *bb*. Supposons que le disque inférieur *aa* soit poussé par une force N, de manière à soulever par l'intermédiaire de la colonne gazeuse, agissant ici comme un ressort, un poids *n* placé sur le disque d'en haut. En désignant par ω le poids de la colonne *aabb*, on aura

Fig. 3.



$$N = n + \omega.$$

Supposons qu'extérieurement aux deux disques existe un vide absolu: il est manifeste que si l'on fait avancer d'une quantité dl le disque d'en bas, celui d'en haut se transportera d'une quantité égale car, les poids n et N auxquels la tension du gaz fait équilibre étant invariables, la longueur du ressort ne pourra changer; on aura donc

$$N\,dl = n\,dl + \omega dl$$

c'est-à-dire que le travail moteur élémentaire dépassera dans ce cas le travail résistant de toute la quantité nécessaire pour élever de la

quantité dl la masse gazeuse faisant fonction de ress ort.

Le même principe est évidemment applicable au cas d'un tube incliné, en remplaçant le poids ω du gaz par la composante de ce poids suivant la pente du tube ou, ce qui revient au même, en substituant par la pensée à la colonne inclinée, une colonne verticale de même base et ayant pour hauteur la différence de niveau des deux extrémités de la galerie en pente. Si, par exemple, on refoulait un train dans un tube d'une longueur quelconque, rachetant une chûte totale d'un kilomètre de hauteur, on trouverait, en se reportant à la formule (1), que lorsque le train est au haut de sa course on a

$$N = 1.134\,n$$

n représentant ici la composante du poids du train suivant la pente du tube. Ainsi dans ce cas le travail moteur dépasserait de 13.40 °/₀ le travail résistant, résultat dont on aurait lieu d'être satisfait; on va voir en outre, que la présence de l'atmosphère, dont on a fait abstraction jusqu'ici, modifie les conditions de la propulsion d'une manière fort avantageuse.

Nous allons donc chercher à nous rendre compte du jeu de l'air comprimé, introduit sous une pression déterminée à la partie inférieure du tube, s'élevant peu à peu en subissant une détente

partielle, et venant enfin vaincre la double résistance, l'une constante et provenant du poids du train, l'autre décroissante et égale à la pression de l'air extérieur, qui s'oppose à la marche du bouclier et du convoi auquel il est attaché.

Nous négligerons provisoirement dans ce calcul, comme nous l'avons fait jusqu'ici, l'effet des fuites d'air et du frottement du gaz sur les parois du tube: ces causes de pertes de force seront examinées ensuite, et feront l'objet de deux corrections successives.

Soient: R le poids du train qui doit être refoulé par l'air comprimé;

ρ le coefficient du roulement;

i la pente par mètre, supposée constante, du tube AA'BB'; (*Fig.* 2.)

F le frottement total du bouclier contre les parois du tunnel;

D Le diamètre du tube supposé à base circulaire;

S la section du tube et du bouclier $= \pi \frac{D^2}{4}$;

P la pression atmosphérique au bas du tube, c'est-à-dire en AA';

p la pression atmosphérique en CC', où l'on suppose le disque parvenu dans sa course;

l la distance variable de A en C.

En désignant par h la distance verticale qui

sépare les mêmes points A et C, on aura toujours $h = li$; en reportant cette valeur de h dans la formule (1) il sera toujours facile de obtenir, pour chaque position du disque, la relation existant entre la constante P et la variable p; nous poserons

$$\frac{P}{p} = 1 + \alpha,$$

α étant une quantité généralement petite, et variable avec la position du bouclier dans le tube.

La résistance totale opposée par le train sera égale à $R(1+\rho)+F$, de telle sorte qu'en désignant par m l'excès de pression de l'air comprimé derrière le bouclier CC' sur la pression atmosphérique p, on aura la relation

$$m = \frac{R(i+\rho)+F}{S};$$

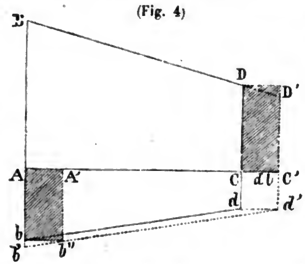
la tension de l'air comprimé au bas du tube en AA' sera, toujours d'après la formule (1)

$$(p+m)(1+\alpha) = P + m(1+\alpha) = P + M$$

en posant $M = (1+\alpha)m$.

Si à l'extrémité A d'une base $AC = l$, (*Fig.* 4.) on élève des ordonnées AB et Ab respectivement égales à P et M, et qu'à l'extrémité C, on élève de même des ordonnées CD et Cd égales à p et m, on obtiendra en tirant les lignes BD et bd, une figure trapézoïdale représentant en chacun des points du tube situés derrière le

bouclier, tant la pression atmosphérique (ordonnées positives) que celle de l'air faisant ressort (ordonnées négatives).



(Fig. 4)

Supposons maintenant que l'on introduise à la base du tube, de l'air à la pression P + M de manière à faire avancer le bouclier de la quantité CC' = dl; si l'on prolonge la ligne BD jusqu'en D' et qu'on prenne d'un autre coté C'd' = Cd = m, l'ordonnée totale D'd' représentera la nouvelle pression de l'air comprimé derrière le bouclier, et si l'on tire une ligne $b'd'$ parallèle à bd, la figure trapézoïdale Bb'D'd' représentera pour la nouvelle position du disque, la pression totale de l'air en chaque point du tube; si l'on prend en outre AA' = CC' = dl, il est manifeste que l'ordonnée A'b'' sera parfaitement égale à Ab, et que les deux trapèzes Ab Cd, A'b''C'd' auront identiquement les mêmes dimensions.

Ainsi la surface du nouveau trapèze Bb'D'd', est égale à celle du trapèze primitif BbDd, augmentée de celle des petits rectangles AA'bb''=Mdl et CC'DD'=p dl; d'où il suit que l'avancement du bouclier d'une quantité dl, correspond à l'introduction dans le tube d'une tranche d'air

d'épaisseur dl à la pression p, et d'une autre tranche de même épaisseur à la pression M, soit encore à l'introduction d'une tranche unique d'épaisseur $\frac{p+M}{P+M}\,dl$, sous la tension P + M qui existe effectivement à la base du tube.

Si l'on suppose pour un instant que cette tranche d'air ait été fournie par un cylindre D (*Fig.* 1.) de même section S que le tube lui-même, on voit que le piston de ce cylindre a du s'avancer d'une quantité

$$(3) \qquad dx = \frac{p+M}{P+M}\,dl$$

pour faire marcher le bouclier de la quantité dl

L'équation précédente peut encore se mettre sous la forme

$$S(P+M)\,dx = S\,(p+M)\,dl = S(p+m)dl + Sm \times \alpha dl.$$

Or S (P + M) dx représente le travail moteur produit, tant par la pression atmosphérique S P que par la force quelconque SM agissant sur la piston DD'; S $(p+m)$ dl représente de même le travail résistant total, tant de la pression atmosphérique, que du train refoulé; enfin $Sm\alpha = SM - Sm$ n'est autre chose que la composante suivant la pente du tube du poids de l'air qui

fait ressort: ainsi le travail moteur total à l'entrée du tunnel est supérieur, au travail résistant total contre le bouclier, de toute la quantité nécessaire pour vaincre le poids du ressort et le faire avancer autant que le train lui-même, résultat auquel on devait en effet s'attendre.

D'un autre côté le travail utile réellement produit se réduit à $Sm.dl = dT_r$ et le travail moteur, autre que celui de l'atmosphère, réellement dépensé, est égal à $SM.dx = dT_m$.

En introduisant ces expressions dans l'équation (3), on a

$$dT_m = SMdl \frac{p + M}{P + M} = dT_r (1 + \alpha) \frac{p + M}{P + M}$$

ou bien

$$dT_m = dT_r \frac{P + M(1 + \alpha)}{P + M}$$

$$\frac{dT_m - dT_r}{dT_r} = \frac{M\alpha}{P + M}$$

Si l'on faisait dans cette équation $P = o$, c'est-à-dire si l'on admettait l'existence du vide de part et d'autre du ressort d'air, on trouverait

$$\frac{dT_m - dT_r}{dT_r} = \alpha,$$

quantité qui serait égale à 0.131 dans le cas

où la pente totale rachetée par le tube atteindrait un kilomètre: on retomberait ainsi sur un résultat déjà fourni par un calcul antérieur.

Mais si l'on suppose au contraire, ce qui arrivera toujours en pratique, que la pression M soit faible par rapport à P, on reconnaîtra que la perte de force résultant de la pesanteur de l'air sera très-minime et négligeable dans la plupart des cas qui pourront se présenter.

Prenons par exemple $l = 10\,000$ mètres, $i = 0.10$ d'où $\alpha = 0.134$, faisons $\rho = 0.005$, $F = 0$, $R = 160\,000$ kilogr.; $S = 16^{m.q}.60$, $P = 10\,000$ kilogr.; nous trouverons $m = 1000$ kilogr. environ, $M = 1134$ kilogr. et

$$\frac{dT_m - dT_r}{dT_r} = 0.013. \ (1)$$

(1) On peut arriver au même résultat sans entrer dans l'examen des mouvements différentiels ; supposons que l'on refoule un piston, chargé d'un poids quelconque, dans l'intérieur d'un tube vertical de hauteur totale H et de section S, au moyen d'une colonne d'air comprimé ; supposons en outre cet air fourni par un cylindre horizontal dans lequel on l'aura préalablement renfermé au commencement de l'opération : soit N la section du cylindre, B la longueur qu'y occupait la colonne d'air avant l'ascension ; désignons par δ la densité moyenne de l'air dans ce cylindre et par δ' la densité de ce même gaz refoulé tout entier dans le tube vertical, et occupant la hauteur H; on aura forcément

$$N\,B\,\delta = S\,H\,\delta'$$

car chacune de ces expressions représente le poids de la même colonne d'air à des degrés différents de compression, et ce poids ne peut changer en passant d'un cylindre horizontal dans un tube vertical.

Ainsi la perte ne dépassera guères un pour cent du travail résistant, dans le cas, probablement assez rare, d'un tube rachetant une différence de niveau de mille mètres.

Cela posé, soient P et p les pressions atmosphériques à la base et au sommet du tube, m la tension du ressort d'air contre le piston, M cette tension à la base du tube ; on aura toujours

$$\frac{M}{m} = \frac{P}{p} = 1 + \alpha;$$

la pression moyenne de l'air dans le tube vertical sera égale à

$$\frac{p + m + P + M}{2.} = (p + m)(1 + \frac{\alpha}{2})$$

on aura donc

$$\delta' = \beta\,(p + m)\,(1 + \frac{\alpha}{2}),$$

β étant un coefficient constant.

La pression d'introduction de l'air dans le tube sera P + m au commencement de l'ascension du piston, et P + M à la fin de cette ascension, en moyenne cette pression sera égale à

$$P + \frac{1}{2}(M + m):$$

on aura donc de même

$$\delta = \beta \left\{ P + \frac{1}{2}(M + m) \right\}.$$

En substituant, l'équation ci-dessus devient

$$N\,B\left\{P + \frac{1}{2}(M + m)\right\} = S\,H\,(p + m)\,(1 + \frac{\alpha}{2})$$

D'un autre côté, le travail résistant total a pour expression

$$T_r = Sm \times H$$

et le travail moteur total, autre que celui de la pression atmosphérique, a pour valeur

$$T_m = \left\{P + \frac{1}{2}(M + m) - P\right\} N \times B =$$

$$= N\,B \times \frac{1}{2}(M + m),$$

On peut encore mettre l'équation trouvée plus haut sous la forme

$$\frac{d\,T_m - dT_r}{dT_r} = \frac{m\alpha(1+\alpha)}{P + m(1+\alpha)}$$

---

d'où :

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{NB\,\frac{1}{2}\,(M+m)}{Sm \times H} =$$

$$= \frac{\frac{1}{2}\,(M+m)\,(p+m)\,(1+\frac{\alpha}{2})}{m\left\{P + \frac{1}{2}\,(M+m)\right\}} =$$

$$= \frac{(p+m)\,(1+\frac{\alpha}{2})^2}{P+\frac{1}{2}\,(M+m)}\,.$$

ou par approximation

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{(p+m)\,(1+\alpha)}{P+\frac{1}{2}\,(M+m)} = \frac{P+M}{P+\frac{1}{2}\,(M+m)}\,.$$

Faisons comme précédemment

$P = 10\,000$ kil.
$m = 1\,000$ »
$M = 1\,134$ »

nous aurons

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{11\,134}{11\,067} = 1.\,0065.$$

Nous trouvons donc une perte *moyenne* de 65 dix-millièmes, tandis que par une autre méthode de calcul nous avons trouvé une perte *maximum* précisément double, à la fin de la course ascendante du piston : les deux résultats sont donc parfaitement concordants, puisque la perte est nulle à l'origine et croit en progression arithmétique.

dans laquelle il n'y a plus que la quantité α qui soit variable.

Au moment où commence l'ascension du train, cette quantité est nulle; on a donc alors $dT_m = dT_r$, ce qui devait nécessairement avoir lieu.

On a supposé dans ce qui précède que la section du bouclier était égale à celle du tube lui-même, c'est-à-dire que ce bouclier agissait comme un piston glissant à frottement dans le tunnel: on conçoit que cette disposition serait difficilement réalisable, et qu'il existera généralement un jeu entre les parois de la galerie et le pourtour du disque: soit e ce jeu; la surface annulaire S'' par laquelle s'échappera une portion de l'air comprimé sera égale à πDe; en appelant S' la surface du piston, on aura $S = S' + S''$, la valeur de m sera dans ce cas

$$\frac{R\,(i + \rho) + F}{S'}$$

Tout ce qui a été dit précédemment sur les pertes dues au poids de l'air, demeurera applicable à la colonne de base S' qui pressera la surface du bouclier: il restera à tenir compte de la colonne d'air de base S'', qui douée derrière le bouclier d'une tension $p + m$, s'écoulera dans un milieu dont la pression sera égale à p.

La vitesse V'' d'un gaz qui s'échappe d'un

réservoir par un orifice en mince paroi, est donnée par la formule

$$V'' = \sqrt{2gh \cdot \frac{\delta}{\delta''}}$$

h étant la hauteur manométrique représentant l'excès de pression qui détermine l'écoulement, δ le poids spécifique du liquide contenu dans le manomètre, δ'' le poids spécifique de l'air comprimé qui s'écoule.

Dans le cas particulier qui nous occupe on aura $h\delta = m$; de plus, en désignant par β le rapport constant du poids spécifique de l'air à sa tension, (la température étant toujours égale à zéro) on aura

$$\delta'' = \beta\,(p + m); \qquad V'' = \sqrt{2g\frac{m}{\beta\,(p+m)}}\,.$$

Nous rappellerons que la valeur numérique de β est égale à $\frac{1^k.30}{10^k.330} = 0.000126$, et que l'on a $g = 9.81$.

Le volume de gaz s'écoulant par la surface S'' aura donc pour expression

$$(4) \qquad K\,S''\,V'' = K\,S''\sqrt{2g\frac{m}{\beta\,(p+m)}}$$

K étant un coefficient de contraction qu'on devra

dans le cas actuel porter à 0.85, parceque la contraction n'aura lieu que du côté de la veine opposé au tube.

Supposons que le gaz, s'échappant ainsi au pourtour du bouclier, soit fourni au bas du tube par un cylindre spécial o' d'une section S''': le volume de gaz qui devra sortir en chaque seconde de ce cylindre sera précisément égal à celui qui figure dans l'expression (4) multiplié par le rapport inverse des pressions, c'est-à-dire par la quantité $\frac{p+m}{P+M}=\frac{1}{1+\alpha}$, de telle sorte qu'en désignant par dz le déplacement par seconde du piston EE', on aura

$$S''' \, dz = \frac{KS''}{1+\alpha}\sqrt{2g\frac{m}{\beta(p+m)}}$$

Le travail moteur total du piston EE' s'élèvera à

$$S''' (P+M) \, dz$$

et en mettant de côté le travail S''' P dz gratuitement fourni par la pression atmosphérique, la perte de force réellement subie en chaque seconde aura pour expression

$$M \, S''' \, dz = m \, K \, S''' \sqrt{2g\frac{m}{\beta(p+m)}}\,.$$

Supposons, pour prendre un exemple, qu'on veuille laisser entre le tube et le bouclier un jeu de 0ᵐ.05, ainsi que l'ont proposé quelques

ingénieurs: faisons $p = 10000$ kilogr., $m = 1000$ kilogr., ce qui rentrera dans les conditions ordinaires de la pratique, on aura:

$e = 0^m.05, \quad S'' = \pi \times 4^m.60 \times 0.05 = 0^{m.q}.72,$

d'où l'on tirera

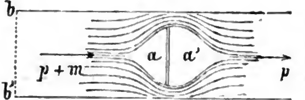
$$V'' = 118 \text{ mètres}, \; K\,S'' = 0.^m 612.$$

La perte de travail en une seconde s'élèvera donc à

$1000^k \times 0^{m.q}.612 \times 118^m. = 72\,216$ kilogrammètres, soit à près de mille chevaux-vapeur (1):

(1) Le calcul précédent a besoin d'une correction, en ce sens que, par suite de l'écoulement même du gaz au pourtour du bouclier, la pression en a, (Fig. 5) derrière ce bouclier, devient un peu supérieure à $p + m$, tandis qu'en a' elle devient un peu inférieure à p: il en résulte un effet favorable à la propulsion du train. Si l'on désigne par $m + x$ la différence de pression d'un côté à l'autre du disque, on aura

Fig. 5.



$$(m + x)\,S' = \delta' S' \frac{U^2}{2g} \times \frac{S}{S'} \left\{ \frac{\frac{S}{S'}}{K\left(\frac{S}{S'} - 1\right)} \right\}^2$$

$$= \delta' S \frac{U^2}{2g} \left\{ \frac{\frac{S}{S'}}{K\left(\frac{S}{S'} - 1\right)} \right\}^2,$$

δ' étant le poids spécifique du gaz à la pression $p + m$, S et S' les surfaces du tube et du bouclier, U la vitesse du gaz dans une section telle que bb', K le coefficient de contraction $\doteq 0.85$ (le bouclier étant lui-même supposé fixe, pour simplifier le calcul).

ainsi une machines soufflante, donnant 50 % d'effet utile, subirait en ce cas une perte de force de deux mille chevaux: encore n'avons nous pas tenu compte jusqu'ici du frottement de l'air contre les parois du tube, frottement qui accroitrait d'une manière notable la déperdition que nous venons de calculer.

Il y a donc lieu, d'aprés ce qui précède, d'abandonner sans retour pour le passage des montagnes, la disposition qui consisterait à faire

---

Si l'on applique à cette formule les mêmes données que ci-dessus, c'est-à-dire si l'on fait $\delta' = \frac{1.30}{10\,330}(p+m) = \frac{11\,000 \times 1.30}{10\,330}$

$= 1.^{k}39$; $S = 16^{m.q.}60$; $S' = 16^{m.q.}60 - 0^{m.q.}72 = 15^{m.q.}88$; $U = \frac{K.\ S''.V''}{S}$

$= \frac{0.85 \times 0^{m.q.}72 + 118^{m}}{16^{m.q.}60} = 4.^{m}35$, la formule deviendra

$$(m+x)\,S' = 1^{k}.39 \times 16^{m.q.}60\ \frac{4.35^{2}}{2 \times 9.81} \times$$

$$\left(\frac{\frac{16^{m.q.}60}{15^{m.q.}88}}{0.85\left(\frac{16^{m.q.}60}{15^{m.q.}88} - 1\right)}\right)^{2}$$

$(m+x)\,S' = 16\,800^{kil.}$ environ; mais on a déjà $M\ S' = 15\,880$, d'où $x\ S' = 920$ kilogrammes et $x = 58$ kilogrammes.

On voit que cette correction n'est pas négligeable, car en admettant que le train soit animé d'une vitesse de 5 mètres par seconde, vitesse qui ne sera probablement jamais dépassée, la pression $x\ S'$ produirait dans le même temps un travail de 4 600 kilogrammètres, ou de 60 chevaux-vapeur, qui réduiraient la perte de 72 216 kilogrammètres, ou de 960 chevaux à 900 chevaux seulement. Cependant cette perte est encore trop considérable pour ne pas motiver l'exclusion absolue du piston laissant un grand jeu entre lui et le tube.

circuler dans le tube un bouclier unique à paroi mince, et présentant assez de jeu pour ne jamais heurter les parois de la galerie dans les mouvements de lacet les plus considérables auxquels il pourrait être exposé.

On arriverait à un résultat tout opposé, si l'on avait pour objet d'appliquer la propulsion pneumatique à un chemin de fer tel que le *Metropolitan-Railway* de Londres, c'est-à-dire à une ligne où l'on voudrait éviter la fumée des locomotives, mais où les pentes ne dépasseraient pas $0^{m}.02$ par mètre et le poids des trains 80 tonnes.

En faisant toujours $S = 16^{m.q}.60$, $S'' = 0^{m.q}.72$, d'où $S' = 15^{m.q}.88$ et $p = 10\,000$ kilogrammes et en posant $F = o$, on aurait dans cette hypothèse

$$m = \frac{R(i+\rho)+F}{S'} = \frac{80000 \times 0.025}{15^{m.q}.88} = 126 \text{ kil.}$$

$$V'' = 14^{m}.02.$$

La perte de force motrice correspondant aux quantités ci-dessus se réduirait à

3396 kilogrammètres

par seconde, soit à 45 chevaux-vapeur; en doublant cette perte pour tenir compte de toutes les résistances propres aux machines soufflantes, on arriverait à un total de 90 chevaux, consommé en pure perte par les fuites d'air; résultat très-admissible si l'on songe qu'une pa-

reille déperdition n'aurait lieu que sur les partie du chemin en pente de 0m.02 et deviendrait presque nulle sur les paliers.

Ainsi le système atmosphérique pourrait être appliqué sans aucune précaution spéciale aux chemins souterrains des grandes capitales; il suffirait de construire avec une certaine précision les galeries destinées à la circulation des convois; le piston propulseur se réduirait à un simple disque d'un diamètre inférieur de 0m.10 à celui de la galerie; on pourrait du reste, comme à Sydenham, diminuer les fuites d'air en garnissant d'une brosse en crin flexible la périphérie de ce bouclier.

Le problème ne peut malheureusement pas se résoudre avec la même simplicité pour les passages des montagnes destinés à un trafic actif. et où il importe par conséquent de faire circuler des trains pesants sur de fortes pentes: on pourrait, en ce cas, réduire notablement les fuites d'air. en employant plusieurs boucliers au lieu d'un seul: supposons, par exemple, qu'on place quatre disques dans la longueur du train; les pressions s'échelonneront d'un disque au suivant à peu près comme l'indique la figure 6, et la vitesse d'écoulement, proportionnelle à la racine carrée de la charge, deviendra sensiblement moitié moindre. En général si l'on emploie n bou-

Fig. 6.

$p+m$ | $p+\frac{3}{4}m$ | $p+\frac{1}{2}m$ | $p+\frac{1}{4}m$ | p

cliers au lieu d'un seul, la perte de travail due aux fuites d'air aura pour expression approximative

$$m \mathrm{K} \mathrm{S}'' \sqrt{\frac{2gm}{\beta (p + m) n}}$$

Il est bien évident qu'il ne serait pas possible en pratique d'introduire un grand nombre de boucliers dans la composition du train : il serait également fort incommode d'adapter à chaque wagon un ou plusieurs écrans, puisque cela exigerait l'adoption d'un matériel spécial à la propulsion pneumatique, c'est-à-dire un double transbordement aux extrémités du tube des voyageurs et des marchandises : mais on pourrait substituer au bouclier à paroi mince, un tambour d'une certaine longueur, portant une série d'écrans : on reviendra sur cette disposition dans la deuxième partie de ce travail.

Les formules qui ont été données plus haut pour déterminer les fuites d'air, ont montré que dans un cas pratique un jeu de $0^{m}.05$ ferait perdre 2000 chevaux de force aux machines soufflantes : chaque millimètre de jeu au pourtour du bouclier correspond ainsi à une perte de 40 chevaux : il suit de là que la porte d'entrée du tunnel devra être construite avec le plus grand soin, de manière à obtenir une fermeture hermétique.

Comme la perte de 2000 chevaux dont nous venons de parler, est due au jeu de $0^{m.q.}.72$, on

peut encore dire que chaque décimètre carré de section, offert à l'écoulement de l'air, laisse échapper environ 28 chevaux de force: ce chiffre fait voir qu'une ou plusieurs fissures qui se produiraient accidentellement dans le tube, n'empêcheraient pas le système de fonctionner.

Il ne nous reste plus maintenant à calculer que le travail moteur qui sera nécessaire pour vaincre les frottements de l'air en mouvement, contre les parois du tunnel; remarquons d'abord que ces frottements se développeront toujours dans la longueur entière du tunnel, aussi bien, par conséquent, dans la colonne d'air à la pression atmosphérique que le disque chassera devant lui, que dans la colonne d'air comprimé qui poussera le disque lui-même. En supposant d'ailleurs que la vitesse du train, et par suite la vitesse moyenne de la colonne d'air en mouvement soient constants, comme l'intensité du frottement est proportionnelle au poids spécifique du gaz qui s'écoule, la perte totale de force qu'il s'agit de calculer sera d'autant plus grande que la colonne d'air comprimé occupera elle-même une portion plus notable du tube; la perte maximum aura donc lieu quand le train parviendra au sommet du tunnel; c'est cette perte maximum que nous nous bornerons à déterminer.

Appelons V la vitesse de l'air qui s'écoule dans la galerie, V' la vitesse du train; la valeur de V sera donnée par la relation

$$V S = V' S' + V'' S'' \times K$$

Cela posé, si nous désignons par μ la perte de charge ou différence de pression d'une extrémité à l'autre de la conduite, éterminéee par les frottements, nous aurons

$$\mu = \frac{0.024 \ \delta' \ l \ V^2}{2 \ g \ D}$$

formule qu'on trouve dans tous les aide-mémoire et dans laquelle δ' représente le poids spécifique du gaz à la pression $p + m$, l la longueur de la conduite et D son diamètre.

Reprenons les mêmes données que ci-dessus, faisons en d'autres termes $p = 10000$ kilogrammes, $m = 1000$ kilogr. $l = 10000$ m, $D = 4^m.60$; si nous supposons en outre pour un instant que les fuites d'air soient nulles, et que le train se meuve avec une vitesse V' de 5 mètres par seconde ou de 18 kilomètres à l'heure, nous aurons $V = V' = 5^m.00$ d'où $\mu = 98^{kil}.67$.

Ainsi l'excès de pression qu'il faudrait donner à la colonne d'air comprimé pour vaincre le frottement de cette colonne sur les parois du tube serait à peu près égal au dixième de la tension m nécessaire à la propulsion: le travail moteur subirait donc, en raison des frottements, une augmentation de 10 % environ, soit un accroissement de 1 % par chaque kilomètre de tube; mais si l'on voulait marcher à la vitesse de 10 mètres par seconde

la perte deviendrait quadruple et à la vitesse de 20 mètres, elle prendrait une valeur 16 fois plus grande.

Ainsi les frottements de l'air en mouvement contre les parois du tube ne seront jamais un obstacle à l'application du système atmosphérique, même sur des longueurs de 10 à 15 kilomètres, pourvu que l'on se contente d'assigner aux trains une vitesse modérée; mais ils empêcheront toujours de pousser cette vitesse aux limites actuellement atteintes sur les grandes lignes de chemins de fer, construites en plaine et exploitées par des locomotives; inconvénient bien secondaire si l'on songe au petit nombre de kilomètres qui devront dans chaque cas spécial être franchis par le système de traction que nous étudions ici.

Revenons maintenant au cas d'un train animé d'une vitesse $V'=5^{m}.00$, et supposons cette fois l'existence d'un jeu $S''=0^{m.q}72$: nous trouverons

$$V=\frac{5^{m}.00\times 15^{m.q}.88+118^{m}.00\times 0^{m.q}.72}{16^{m.q}.60}=9^{m}.13$$

d'où $\mu=327$ kilogrammes.

Ce chiffre fait voir tous les inconvénients des fuites d'air au point de vue des frottements contre les parois du tube, et montre une fois de plus la nécessité de combattre énergiquement cette cause de déperdition de force, la

seule d'ailleurs qui ne soit pas négligeable dans le système qui nous occupe.

Il est maintenant facile en résumant ce qui précède de trouver l'équation générale du mouvement uniforme d'un train dans l'intérieur du tube. On supposera pour plus de simplicité, que l'air nécessaire à la propulsion proprement dite soit fourni par un cylindre de base S', et l'air consommé par les fuites par un second cylindre de base S''.

En désignant par dx' l'avancement en une seconde du piston dans le premier cylindre, correspondant à un avancement dl du bouclier, on aura, en se reportant à l'équation (3) et en y remplaçant $P + M$ par $P + M + \mu$, véritable valeur de la pression à l'entrée du tube

$$dx' = dl \frac{p + M}{P + M + \mu};$$

le travail moteur T'_m, absorbé par la propulsion proprement dite, sera abstraction faite du travail gratuit de la pression atmosphérique

$$T'_m = S'(M + \mu)\, dx = S' \frac{(M + \mu)(p + M)}{P + M + \mu} dl =$$

$$= S'V \frac{(M + \mu)(p + M)}{P + M + \mu}.$$

Désignons de même par dx'' l'avancement en une seconde du piston fournissant l'air con-

sommé par les fuites, et par T''_m le travail moteur correspondant. Le volume de gaz à la pression $p+m$ écoulé en une seconde a pour expression $KS''V''$: on aura donc

$$S''dx''(P+M+\mu)=KS''V''(p+m)$$

$$dx''=KV''\frac{p+m}{P+M+\mu}$$

et le travail T''_m aura pour expression

$$T''_m=K\,S''\,V''.\frac{(M+\mu)\,(p+m)}{P+M+\mu}.$$

en posant $T_m=T'_m+T''_m$, on trouvera enfin

$$(5)\quad T_m=\frac{M+\mu}{P+M+\mu}\left\{(p+M)\,S'\,V'+(p+m)\,K\,S''V''\right\},$$

équation qui donne la valeur du travail moteur total à fournir à l'entrée du tube ; le travail résistant du train sera de son côté représenté per l'équation

(6) $$T_r=S'\,V'\,m$$

Exemple de Calcul

l longueur du tube $=12500$ mètres ;
i pente par mètre $=0^m.08$;
h hauteur totale rachetée $=li=1000$ mètres ;

D diamètre du tube $= 4^m.60$;

p pression atmosphérique à l'extrémité supérieure du tube $= 9000$ kilogr.;

P pression atmosphérique à l'extrémité inférieure du tube $= 10\,206$ kilogr. (résultat donné par la formule $\text{Log}\,P = \text{Log}\,p + 0.00005\,1629\,h$);

α (quantité auxiliaire) $= \dfrac{P - p}{p} = 0.134$;

R poids du train $= 200\,000$ kilogr.;

S Section du tube $= \dfrac{\pi D^2}{4} = 16^{m.q.}.60$;

e jeu entre le piston et le tunnel $= 0^m.05$;

S'' section totale du jeu $= \pi De = 0^{m.q.}.72$;

S' section du piston $= S - S'' = 15^{m.q.}.88$;

F frottement du piston contre les parois du tube $= 0$;

ρ frottement de roulement des véhicules composant le train $= 0.005$;

m tension de l'air faisant ressort derrière le bouclier $= \dfrac{R(i + \rho) + F}{S'} = 1070$ kilogr.;

M tension de l'air faisant ressort au bas du tube $= m(1 + \alpha) = 1213$ kilogr.;

V' vitesse du train par seconde $= 5^m.00$;

V'' vitesse de l'air s'échappant par le jeu $e =$

$$\sqrt{\frac{2gm}{\beta\,(p + m)}} = 128^m; \quad g = 9.81;$$

(ρ étant le rapport du poids spécifique de l'air à sa pression = 0.000126);

K coefficient de contraction de l'air s'échappant par l'ouverture $S'' = 0{,}85$;

V vitesse de la colonne d'air dans le tunnel près du bouclier $= \frac{V'S' + KV''S''}{S} = 9^m.50$;

μ accroissement de pression nécessaire pour vaincre le frottement de l'air contre les parois de galerie $= \frac{0.024\, \delta' l V^2}{2gD} = 383$ kilogrammes.

(δ' étant le poids spécifique de l'air à la pression $p + m$; d'où $\delta' = 1^k.266$);

$$T_m = \frac{M + \mu}{P + M + \mu} \left\{ (p + M) S'V' + (p + m) KS''V'' \right\}$$

$$= \frac{1596}{11802} (10213 \times 79.40 + 10070 \times 0.85 \times 78.33)$$

= 20 033 kilogrammètres, ou 2671 chevaux;

$T_r = mS'V' = R\,(i + \rho)\,V' = 85000$ kilogrammètres ou 1133 chevaux;

$T_m - T_r = 1538$ chevaux;

$\frac{T_r}{T_m} = 42\,\%$.

Mêmes données que ci-dessus, en faisant seulement $e = 0^m.007$: on trouve $S'' = 0^{m.q}.10$, $S' = 16^{m.q}.50$, $m = 1030$ kilogr., $M = 1168$ kilogr. $V'' = 126^m.50$, $V = 5^m.62$, $\mu = 133$ kilogr.,

$T_m = 107\,150$ kilogrammètres $= 1429$ chevaux,

$T_r = 1133$ chevaux,

$T_m - T_r = 296$ chevaux,

$\frac{T_r}{T_m} = 79\,\%$.

Si l'on employait plusieurs boucliers ou écrans au lieu d'un seul, la quantité d'air s'échappant au pourtour de ces écrans serait inversement proportionnelle à la racine carrée de leur nombre n: le volume écoulé étant en même temps proportionnel à e, on n'altérerait en rien les résultats du dernier exemple qui vient d'être cité, en déterminant e au moyen de la relation

$$e = 0.007 \sqrt{n};$$

ainsi avec deux boucliers, on pourrait faire, $e = 0^m.01$, avec quatre boucliers, $e = 0^m.014$, avec dix-huit diaphragmes successifs, $e = 0^m.03$; enfin avec 50 diaphragmes, $e = 0.^m05$: chacune de ces hypothèses donnerait le même résultat final, c'est-à-dire $\frac{T_m - T_r}{T_r} = 26\,\%$.

On discutera plus loin la valeur pratique de de ces différents chiffres.

Autre exemple de calcul applicable au passage du Splügen.

$l = 8000^m$, $i = 0.095$, $h = li = 760$ mètres.
$D = 4^m.80$ (on a porté le diamètre du tube à $4^m\,80$ pour laisser passer tous les types de cheminées de locomotives).
$p = 8200^{kil.}$ (à la cote 1840^m au dessus de la mer);
$P = 9020^{kil.}$. $\quad \alpha = \dfrac{P - p}{p} = 0.10$, $R = 200$ tonnes, $S = 18^{m.q}.10$, $e = 0^m.01$, $F = 0$, $S'' = \pi De = 0^{m.q}.15$, $S' = S - S'' = 17^{m.q}.95$, $\rho = 0.005$

$$m = \frac{R(i + \rho) + F}{S'} = 1114 \text{ kil.}$$

$M = m(1 + \alpha) = 1225$ kil.
V' vitesse du train $= 5^m.00$
$V'' = 136^m$, $V = 5^m.90$
$\mu = 83$ kilogrammes
$T_m = 1700$ chevaux
$T_r = 1330$ chevaux

$$\frac{T^r}{T_m} = 78\ \%$$

Quelques ingénieurs ont pensé qu'on obtiendrait une propulsion plus économique en morcelant les trains, mais il est aisé de voir que c'est une erreur, et que cet expédient, tout en

apportant un obstacle sérieux au développement du trafic n'aurait pas en échange l'avantage d'augmenter l'effet utile des machines soufflantes.

Si l'on réduit en effet le poids R à 100 tonnes au lieu de 200, en conservant les données du premier exemple, on trouve

$$\text{pour } e = 0{,}05, \quad \frac{T_r}{T^m} = 41\ \%$$

$$\text{et pour } e = 0{,}007, \quad \frac{T_r}{T^m} = 77\ \%;$$

ainsi les pertes sont relativement un peu plus grandes avec un train de cent tonnes qu'avec un train deux fois plus pesant : résultat qui s'explique par cette circonstance que si un convoi léger diminue l'importance relative des fuites, il augmente, toujours relativement, l'effet des frottements de la colonne d'air contre les parois du tunnel; les trains légers permettraient donc d'utiliser des machines plus faibles, mais ils ne diminueraient en rien le travail total à produire, et ils auraient l'inconvénient d'encombrer la ligne et de gêner l'exploitation.

On a invariablement supposé dans les calculs précédents que le train, et la colonne d'air renfermée dans le tube, se trouvaient déjà animés d'un mouvement de translation uniforme que l'on se proposait simplement de maintenir, et les équa-

tions (5) et (6) ne donnent en effet que l'expression du travail à fournir en chaque seconde pour assurer la continuation de ce mouvement. Il faut donc y ajouter le travail consommé une fois pour toutes, par le démarrage du train et l'ébranlement de la colonne d'air; si l'on admet que le poids de cette colonne et celui du convoi forment un total de 500000 kilogrammes, et qu'on veuille communiquer à cette masse une vitesse de $5^m.00$ par seconde, le travail absorbé par la mise en marche aura pour expression:

$$\frac{1}{2} \; \frac{500000}{9.81} \; 25 = 637000 \text{ kilogrammètres}$$

ce qui équivaut au travail de 1500 chevaux *utiles* pendant moins de six secondes: il n'y a donc pas lieu de se préoccuper du temps nécessaire au démarrage des trains.

Il sera toujours nécessaire de ménager à la partie inférieure du tube un palier d'une certaine longueur, sur lequel les trains seront garés pendant la manœuvre de la porte d'entrée du tunnel; les équations précédentes représentent le travail moteur à fournir en chaque seconde au pied de la rampe et non pas contre la porte d'entrée: la différence est tellement faible qu'il est à peine nécessaire d'en parler: cependant si l'on voulait absolument en tenir compte, il suffirait de remplacer dans l'expression de μ la longueur l du tube en pente, par cette même quantité augmentée de la longueur du palier.

Le tunnel, au lieu de présenter une inclinaison constante *i*, se composera en général d'une série de rampes d'une inclinaison variable : les formules ci-dessus seront parfaitement applicables à ce cas, et donneront pour chaque valeur de *i*, l'expression du travail moteur nécessaire au maintien de la marche uniforme du convoi.

Mais comme la compression de l'air renfermé entre le bouclier et l'entrée du tube, devra changer en même temps que la pente, il sera bon quand on voudra passer d'une inclinaison déterminée à une autre plus considérable, de n'opérer ce changement que graduellement, afin de donner le temps aux machines soufflantes d'augmenter le poids et par suite la tension de toute la masse d'air faisant ressort.

Supposons par exemple le train engagé sur une rampe de $0^{m}.10$ par mètre, avec une vitesse de $5^{m}.00$ par seconde; soit $p = 9000^{k}$, $m = 1000$ kilogr; admettons enfin que le convoi soit parvenu à 5 kilomètres de son point de départ : si l'on porte la pente à 0.101 par mètre, l'équilibre exigera que la pression $p + m$ s'élève de 10000 à 10010 kilogrammes environ, c'est-à-dire que la masse d'air existant derrière le bouclier soit augmentée d'un millième. La portion du tube remplie d'air comprimé ayant pour le moment une capacité égale à 5000 S, et les machines soufflantes lançant en chaque seconde un cube égal à 5 S, on voit que l'augmentation de pression désirée serait

obtenue en une seconde seulement, si le train s'arrêtait pendant ce court espace de temps : si au contraire la vitesse, au lieu d'être momentanément annulée, est simplement réduite à $4^m.00$, il faudra, pour ramener la pression au chiffre voulu, un intervalle de cinq secondes, pendant lequel le train aura marché de 20 mètres: on pourra alors porter de la même manière la pente à $0^m.102$, et ainsi de suite: en d'autres termes on pourra augmenter de cinq millièmes l'inclinaison du tube dans l'étendue de chaque hectomètre, sans autre inconvénient que de réduire momentanément la vitesse du train de $5^m.00$ à $4^m.00$ par seconde et en admettant bien entendu, que les machines soufflantes soient en état de lancer toujours dans le tube le même volume d'air à une pression croissante.

Il est superflu de parler du cas où la pente, au lieu d'augmenter, irait en diminuant, car le bouclier sera toujours muni d'une vanne par laquelle on fera échapper, s'il est nécessaire, un certain volume d'air comprimé, de manière à empêcher le train de prendre trop de vitesse.

Les calculs qui précédent ont été établis dans l'hypothèse de la propulsion au moyen de l'air comprimé: les lois de la traction par l'air raréfié étant identiquement les mêmes, nous ne recommencerons pas des calculs qui aboutiraient sinon aux mêmes formules, au moins à des conclusions pratiques absolument semblables; nous nousb ornerons à signaler une circonstance

spéciale à la traction par le vide, à savoir que la mise en marche du train exige que l'air ait été préalablement raréfié dans toute la longueur du tube: si celle-ci est de huit kilomètres, et que le vide à pratiquer soit d'un dixième d'atmosphère, le volume à extraire sera représenté par une colonne de 800 mètres de longueur: les machines étant par hypothèse capables d'extraire en chaque seconde une tranche d'air de 5.^{m} 00, l'opération préliminaire dont nous parlons durera 160 secondes, soit moins de trois minutes: il n'en résultera par conséquent aucun retard appréciable dans la marche des convois.

CHAPITRE DEUXIÈME

Dispositions générales du tube et des appareils de propulsion.

Nous passerons rapidement en revue les principaux résultats auxquels conduisent les formules théoriques du précédent chapitre.

En premier lieu le mouvement ascensionnel de la colonne d'air comprimé, qui fait ressort et pousse le train devant elle, n'absorbe guères plus d'un centième de la force motrice totale, même dans le cas où cette colonne mesure dix kilomètres de longueur : circonstance qui constitue un des avantages les plus saillants du système atmosphérique.

La question des fuites d'air ne se présente pas sous un aspect aussi favorable; ainsi un train de 160 tonnes, engagé sur une rampe de dix centimètres par mètre et animé d'une vitesse de 18 kilomètres à l'heure ne consommerait, en chaque seconde, que 83 mètres cubes d'air comprimé à un dixième d'atmosphère, si le piston s'adaptait rigoureusement aux parois du tunnel; mais si l'on donne au piston un jeu de $0^{m}.05$, comme l'ont proposé quelques personnes, il se produit aussitôt une perte de 72 mètres cubes d'air comprimé par seconde : la consommation d'air et par conséquent de force motrice, se trouve donc immédiatement doublée.

Les frottements de la colonne d'air en mouvement contre les parois de la galerie ne don-

neraient qu'une perte d'environ un pour cent par kilomètre de tube, si la vitesse de cette colonne était seulement de $5^{m.}$ 00; ce qui rentrerait dans l'exemple cité plus haut, d'un train marchant à 18 kilomètres à l'heure, s'il ne se produisait pas de fuites: mais ces frottements croissent comme le carré de la vitesse; par conséquent si celle-ci est doublée par les fuites autour du piston, la perte devient quatre fois plus grande, et s'élève a 4 % par kilomètre de tube, soit à 40 % pour un tube de dix kilomètres.

Voici du reste quelques exemples de calculs dans lesquels il a été tenu compte de toutes les résistances et pertes inhérentes au système atmosphérique; exemples qui montrent clairement tous les inconvénients d'un jeu trop considérable entre le piston et la galerie (1).

Supposons d'abord que l'on prenne les données ci-dessous:

longueur du tube 12500 mètres,
pente $0.^{m}$ 08 par mètre,
hauteur totale rachetée, 1000 mètres,
poids du train, 200 tonnes; vitesse 5 mètres,
jeu au pourtour du piston 0^{m} 05,
T_r travail résistant du train,
T_m travail moteur nécessaire pour introduire

(1) Ces exemples ont déjà été donnés dans le chapitre consacré aux calculs: on les reproduit ici afin de ne pas rendre la lecture de ce chapitre indispensable à l'intelligence de la présente étude.

dans le tunnel l'air déjà comprimé au degré convenable (on calculera plus tard, en parlant des machines soufflantes, le travail préliminaire de la compression).

On trouve

$$T_r = 1133 \text{ chevaux},$$
$$T_m = 2671 \quad »$$
$$\text{Effet utile } \frac{T_r}{T_m} = 42\ \%.$$

Si l'on conserve toutes les données qui précédent, et que l'on réduise seulement le jeu à $0^m.007$, on a toujours. . $T_r = 1133$ chevaux
et l'on trouve . . . . . $T_m = 1429$ »

L'effet utile s'élève donc ici à 79 %, c'est-à-dire qu'il est presque doublé.

Dans un autre exemple, tiré du passage du Splügen, nous avons:

longueur du tube	8000 mètres
pente.	0^m 095 par mètre
hauteur rachetée.	760 mètres
poids du train .	200 tonnes
vitesse	5 mètres
jeu	0.01

$$T_r = 1330 \text{ chevaux}$$
$$T_m = 1770 \quad »$$

L'effet utile est de 78 %; ainsi la propul-

sion s'opérera dans de bonnes conditions, si l'on parvient à limiter à un centimètre le jeu du bouclier.

Si le train est pourvu de plusieurs disques ou boucliers, on peut, sans diminuer l'effet utile augmenter le jeu de chacun d'eux proportionnellement à la racine carrée de leur nombre : l'effet utile de 78 % serait donc encore obtenu avec les données précédentes, si l'on portait le jeu à

0m.02	avec	quatre boucliers
0m.04	»	seize »
0m.05	»	vingt-cinq »

Le problème des fuites serait ainsi résolu si l'on pouvait faire usage d'un matériel roulant spécial: un train de 200 tonnes ne comprend jamais moins de 18 wagons pleins ou vides; en munissant chacun de ces véhicules de deux écrans, on pourrait leur laisser un jeu de 0m.06, bien suffisant pour les empêcher de jamais heurter contre les parois du tunnel.

Malheureusement cet expédient très admissible pour les chemins de fer souterrains des grandes villes, n'est pas applicable à un passage des Alpes; il faudrait dans ce dernier cas, si la multiplication des écrans était le seul moyen de résoudre la difficulté, monter ceux-ci à une faible distance l'un de l'autre sur des wagons spéciaux; mais ce matériel serait lourd, car on ne pourrait guères espacer les écrans

de moins de $0^m.60$, de telle sorte qu'ils occuperaient deux wagons de plus de $7^m.00$ de longueur; le passage de ces véhicules dans les courbes de faible rayon exigerait que l'on élargit de trois à quatre centimètres le diamètre horizontal du tube dont la section deviendrait ainsi légèrement elliptique; par contre cet élargissement devrait être accompagné d'une certaine diminution de pente, afin de compenser l'accroissement de fuites qui en serait le résultat. Assurément rien de tout cela n'est impossible; nous croyons seulement que l'on peut atteindre le même but d'une manière plus simple et plus commode.

M.r Edwards a résolu la difficulté d'une autre manière; dans son modèle à petite échelle, le piston est pourvu d'une peau de mouton qui frotte contre le tube et forme un très bon joint; cet ingénieur se propose, dans l'application en grand, d'y subsituer une brosse en matières filamenteuses: nous craignons que l'usure n'en soit très rapide, et que par suite cet expédient ne soit assez coûteux.

Nous sommes partis d'un principe différent dans l'étude de wagon-disque que nous avons faite (*Planche* I, *fig.* A,B,C) et nous nous sommes proposé d'éviter tout frottement contre les parois de tube.

La partie fixe de notre bouclier n'a que $4^m.14$ de diamètre, c'est-à-dire $0^m.36$ de moins que le tube: la fermeture est complétée par vingt-

deux volets de $0^m.62$ sur $0^m.71$, mobiles autours d'un axe situé à peu près en leur milieu : ces volets sont calculés de manière à se tenir en équilibre, tant sous l'action de leur propre poids, que sous celle de l'air comprimé : le mécanicien, qui se tient sur le wagon-disque, peut au moyen d'une seule et même manivelle agir simultanément sur tous les volets, les appliquer légèrement contre la surface de la galerie par l'intermédiaire de ressorts, ou les écarter tout-à-fait. Chaque volet est maintenu à un centimètre ou un centimètre et demi de la paroi du tunnel par un galet à jante de gutta-percha qui roule sur cette paroi : tout frottement de glissement est donc supprimé et il ne se produit qu'un frottement de roulement à peine appréciable. Enfin, la partie des volets la plus rapprochée du centre du bouclier glisse dans des auges en fonte, tandis que la partie extérieure est munie de couvre-joints pour empêcher les fuites. Ce système est donc très souple, et se prête à toutes les irrégularités de la galerie, à tous les mouvements de lacet du bouclier, enfin au passage des obstacles même assez considérables que le train pourrait accidentellement rencontrer dans le tube. Dans la position normale où ils sont dessinés, les volets peuvent s'écarter de $0^m.05$ et se replier de $0^m.12$; l'amplitude totale de leurs oscillations s'élève donc à $0^m.17$.

D'après ce que nous venons d'expliquer, le

mécanicien peut à son gré ralentir la vitesse du train, l'arrêter tout-à-fait, ou le faire reculer, par le seul jeu de la manivelle qui commande les tiges à ressorts fixées aux volets; ceux-ci sont recourbés à leur extrémité, afin d'éviter les chocs contre les corps saillants dans le cas du mouvement rétrograde; disposition qui rend ce mouvement aussi facile que la marche directe.

On pourrait supprimer entièrment les ressorts et rendre les volets automoteurs, en donnant à leur partie extérieure une surface plus grande qu'à la partie la plus rapprochée du centre du disque: la pression de l'air comprimé tendrait alors à les appliquer contre les parois du tunnel; on obtiendrait le ralentissement, l'arrêt ou le recul du convoi, par l'ouverture plus ou moins considérable d'une vanne, placée dans la membrure du bouclier: cette disposition, plus simple que la précédente, devra l'emporter, si l'expérience prouve qu'elle ne donne pas aux volets un ballottement nuisible à leur conservation.

Dans le cas de la suppression des ressorts, le wagon-disque, après avoir gravi l'un des versants du col à franchir, devra être retourné pour la descente sur le versant opposé: sinon la pression de l'air refoulé par le train déscendant ferait replier les volets, au lieu de les appliquer contre le tube.

L'ouverture complète et simultanée des volets à la descente d'un train, n'aurait du reste

aucune conséquence fâcheuse: dans l'exemple déjà cité d'un des tubes du Splügen la vitesse de l'air s'echappant au pourtour du bouclier, serait de 136 mètres par seconde, et le volume s'écoulant dans le même espace de temps par un vide annulaire de $0^m.12$ de largeur serait d'environ 200 mètres cubes: le train descendrait par conséquent avec une vitesse de $11^m.20$ qui s'amortirait très-facilement sur le palier d'arrivée; tous les volets pourraient donc se déranger à la fois sans qu'il en résultât aucun accident.

Nous pensons qu'en pratique les volets occupant leur position normale contre les parois du tube, le jeu moyen ne dépassera pas douze à quinze millimètres; nous n'en avons admis que dix en établissant les formules relatives à l'un des tubes du Splügen: les fuites seraient donc un peu plus fortes que ne l'indiquent les calculs en question; on les ramènerait au chiffre voulu en attelant au train deux wagons-disque, l'un au milieu et l'autre à l'arrière: cela nous parait d'ailleurs indispensable pour diviser l'effort de propulsion, s'élevant à près de vingt tonnes dans l'exemple cité, et qui appliqué tout entier à l'arrière du train pourrait disloquer les chassis des wagons. Le wagon-disque sera pourvu d'un frein, sans lequel il serait difficile d'obtenir l'arrêt précis du convoi en un point déterminé: d'après ce qui vient d'être expliqué, ce frein n'aura pas besoin en général d'agir d'une manière bien éner-

gique, son rôle étant simplement de compléter l'effet de l'ouverture plus ou moins grande des volets. Cependant une action plus puissante pouvant devenir nécessaire dans quelque circonstance exceptionnelle, nous supposons que ce frein se composera de quatre patins, sur lesquels on aura la faculté de reporter au moment voulu le poids tout entier du wagon-disque, soit environ 16 tonnes; chaque patin sera lui même formé de deux joues latérales légèrement divergentes, entre lesquelles le champignon supérieur du rail s'engagera comme un coin. Cette disposition produira un frottement très considérable et permettra aux freins de deux wagons-disque d'arrêter au besoin un train de 200 tonnes sur une pente de $0^{m}.095$ par mètre.

La résultante des pressions de l'air comprimé sur la surface du bouclier passe exactement par le centre du tube, soit à $2^{m}.10$ environ au dessus du niveau supérieur des rails, et cet effort est transmis au train par l'intermédiaire des tampons de choc, qui ne sont qu'à $1^{m}.00$ au dessus du même niveau: il en résulte un couple assez puissant pour reporter le poids presque entier du wagon-disque sur l'essieu d'avant à la remonte, et sur l'essien d'arrière à la descente; on fera disparaître cet inconvénient en logeant, comme l'indique le figure C, un contrepoids en fonte, du poids de cinq tonnes environ, dans une caisse invariablement attachée au chassis du wagon-disque; le contrepoids étant mobile dans

le sens de la longueur de ce wagon viendra se placer lui-même au point convenable.

Enfin on établira dans la paroi du wagon une écluse ou sas à air, qui permettra au mécanicien de passer d'un côté à l'autre du bouclier et de s'assurer du fonctionnement normal de chaque partie de l'appareil.

Il y a peu de chose à dire sur le mode de construction du tube (*Planche* I, *fig.* D) que le système des volets mobiles dispensera d'établir avec une grande précision : on pourra recourir indifféremment à la maçonnerie de briques, aux moëllons d'appareil, ou aux moëllons bruts recouverts d'un enduit de ciment : la voie sera posée sur longrines, fixées elles mêmes au moyen de tire-fonds sur des blochets scellés dans la maçonnerie : disposition déjà en usage pour les fosses à piquer le feu, et qui donne de bons résultats.

A chaque hectomètre sera pratiquée une niche où se réfugieront les cantonniers lors du passage des trains ; à chaque kilomètre s'élèvera une maison de garde, communiquant avec le tube au moyen d'un sas à air, et pouvant servir de refuge aux voyageurs dans le cas où quelque arrêt accidentel du convoi les obligerait à un séjour trop prolongé à l'intérieur du tunnel.

Voici comment s'opérera le mouvement des trains dans le cas le plus ordinaire d'une rampe unique, c'est-à-dire non immédiatement suivie d'une contrepente.

Chaque train montant, muni suivant les circonstances d'un ou de deux wagons-disque, sera refoulé par une locomotive sur le palier existant à la base du tube : la porte du tunnel sera aussitôt fermée, et les machines soufflantes, lançant l'air comprimé entre cette porte et le bouclier, pousseront progressivement le convoi jusqu'en haut du tube, où recommencera la traction ordinaire au moyen de locomotives.

Pour la descente, le train sera de même conduit par une machine à l'entrée du tunnel, disposé, sur une certaine longueur, en pente de $0^m.01$ par mètre ; les freins du wagon-disque seront serrés, la machine détachée, et la porte inférieure du tube fermée comme précédemment : les freins seront alors desserrés et la pesanteur entrainera le convoi dont la vitesse d'abord croissante, sera bientôt ramenée à la limite voulue au moyen de la tension progressivement acquise par la colonne d'air emprisonnée dans la galerie; mais l'action retardatrice de cet air comprimé ne se produisant pas immédiatement, le train pourrait en certains cas prendre trop de vitesse à l'origine de sa course; on fera donc usage en général d'une deuxiéme porte, placée à l'orifice supérieur du tube, et dont la fermeture déterminant derriére le wagon-disque un vide partiel, donnera au mécanicien la faculté de gouverner le train dès son départ.

Il ne nous reste plus à examiner que la ques-

tion très intéressante des machines soufflantes: dans l'exemple que nous avons emprunté au passage du Spülgen, la section du tube est de 18$^{m.q.}$10 et la vitesse du train de 5^{m}.00, ce qui représente déjà une consommation d'air comprimé de 90^{m}.50 par seconde: mais il faut y ajouter 16^{m}.29 pour les fuites autour du piston (avec un jeu de 0^{m}.01), et environ 3^{m}.21 pour celles qui se produiront à la porte d'entrée: la consommation totale en une seconde s'élèvera donc à 110 métres cubes; en même temps la compression atteindra 1308 kilogrammes par mètre carré, soit 14 $^{1}/_{2}$ $^{0}/_{0}$ de la valeur de la pression atmosphérique dans ces hautes régions: ces données n'étant pas de celles que l'on rencontre d'ordinaire dans les questions de ventilation, les appareils en usage dans l'industrie ne seront pas immédiatement applicables au cas qui nous occupe: les ventilateurs à force centrifuge, par exemple, sont d'une construction économique, peu encombrants, et ont l'avantage de fournir á volonté de l'air raréfié ou comprimé; mais leur effet utile diminue très rapidement quand la charge augmente: il serait donc bien difficile de leur faire produire une tension de 1308 kilog. par mètre carré, correspondant à une colonne de mercure de prés de dix centimètres: une semblable tension exigerait d'ailleurs une vitesse de rotation qui ne serait pas exempte de périls.

On pourrait, comme l'a proposé Mr Beugniot,

se servir de deux ventilateurs étagés: le premier puiserait l'air dans l'atmosphère, lui donnerait un premier degré de compression et le lancerait dans un deuxième ventilateur en communication avec le tunnel: le travail de compression se ferait ainsi en deux fois, et chaque appareil n'aurait à produire que la moitié de la tension finale; cette solution ingénieuse mérite certainement un examen sérieux. Cependant toutes les fois que l'on pourra disposer de puissantes chûtes d'eau il sera peut-être préférable de comprimer l'air au moyen de grands gazomètres (*Planche* I, *figures* E *et* F) dont le mouvement alternatif s'obtiendra d'une manière fort simple.

Le centre de chaque cloche sera occupé par une machine à colonne d'eau, c'est-à-dire par un cylindre vertical en fonte dans lequel glissera un piston dont la tige sera invariablement attachée au fond de la cloche; l'ouverture d'une vanne amènera l'eau sous le piston, le gazomètre sera soulevé, et l'air pénétrant par les clapets placés à sa partie supérieure, viendra le remplir peu à peu. La course ascensionnelle terminée, la vanne d'amenée de l'eau sera fermée, une vanne de sortie sera ouverte, et la cloche commençant à redescendre sous l'action de son propre poids, comprimera progressivement l'air emmagasiné pendant son mouvement d'ascension; quand cet air aura acquis une tension suffisante il soulèvera les clapets de sortie, et pé-

nétrera dans le tunnel où il refoulera le train d'une quantité correspondante à son volume diminué des fuites.

On voit que le mouvement de cette machine soufflante dépendra entièrement du jeu des vannes d'entrée et de sortie de l'eau: on trouvera probablement avantage à manœuvrer directement celles-ci au moyen d'une petite machine à vapeur, ou d'une petite turbine.

La disposition que nous venons de décrire sommairement n'est peut-être pas celle qui donne le plus grand effet utile, mais elle est fort simple et nous croyons qu'à ce titre on devra la préférer à toute autre, toutes les fois que l'on disposera de chûtes d'eau d'un volume restreint, mais d'une hauteur à peu près illimitée.

Il est du reste aisé de calculer l'effet utile de ce genre de machines soufflantes et de compléter ainsi les formules (5) et (6) du chapitre précédent: nous rappellerons que l'on a

$$(5)\quad T_m = \frac{M+\mu}{P+M+\mu}\left\{(p+M)\,S'\,V' + (p+m)\,K\,S''\,V''\right\}$$

$$(6)\qquad T_r = S'\,V'\,m.$$

L'air puisé dans l'atmosphère étant à la pression P et devant être amené à la pression $P + M + \mu$, il est évident que le rapport de la course utile de la cloche à sa course totale est le même que celui de ces deux quantités; il suffira donc de multiplier la valeur de T_m par

la quantité $\frac{P + M + \mu}{P}$, pour avoir égard au travail préliminaire nécessité par la compression de l'air avant son introduction dans le tube.

En outre, pour tenir compte du frottement du gazomètre sur ses guides, de la petite quantité d'air comprimé qui à la fin de chaque course descendante restera dans la cloche, de la perte de charge résultant de la grande vitesse que l'air devra prendre dans les buses conduisant au tunnel, enfin de la perte occasionnée par le jeu des clapets, nous multiplierons encore l'expression du travail moteur par le coefficient 1.20 et nous arriverons à la formule finale

$$(7)\, \mathfrak{G}_m = 1.20 \frac{M+\mu}{P} \left\{ (p+M) S' V' + (p+m) K S'' V'' \right\}$$

qui représente le travail total nécessaire en chaque seconde à la propulsion d'un convoi ; ou ce qui revient au même, la force de la machine capable d'opérer cette propulsion.

Dans l'exemple du Splügen on trouve

$T_r = 1330$ chevaux
$\mathfrak{G}_m = 2330$ »

L'effet utile s'élève donc à 57 %: résultat que tout autre mode de traction fournirait bien difficilement.

Ainsi la machine à colonne d'eau que nous supposons appliquée au soulèvement des cloches,

devra fournir un travail égal à celui de 2330 chevaux-vapeur; mais ce chiffre ne représente que la force nette de la machine, déduction faite de ses résistances propres, c'est-à-dire, des frottements de l'eau dans la conduite d'amenée, des contractions de la veine fluide au passage des vannes, du frottement du piston sur les parois du cylindre où il se meut, de la force nécessaire pour manœuvrer les vannes, etc.

Nous admettons que ces résistances diverses donneront lieu à une perte de 30 %, et que pour produire le travail de 2330 chevaux, la chûte d'eau, choisie comme force motrice, devra en représenter $\frac{2330}{0.70} = 3330$: soit en nombres ronds 3400 chevaux.

Une pareille force parait au premier abord difficile à rencontrer; mais il faut bien remarquer qu'au point où il est nécessaire de se la procurer, la vallée a nécessairement, comme le tube lui même, une pente d'environ $0^{m}.10$ par mètre. Il suffirait donc d'aller prendre l'eau à un kilomètre et demi de distance pour obtenir une charge di 150 mètres, très-admissible dans une machine à colonne d'eau; avec une pareille chûte, une force de 3400 chevaux n'exige que un débit de 1700 litres par seconde : chaque train montant, parcourrant les huit kilomètres du tube en 1600 secondes, consommera 2720 mètres cubes d'eau: avec dix trains montants par jour la consommation ne s'élévera qu'à

27 200 mètres cubes, ce qui correspond à un débit moyen de 315 litres par seconde: il y a bien peu de torrents dans les Alpes qui n'en fournissent davantage même pendant l'hiver.

On voit aussi qu'un reservoir de 13 600 mètres placé à la prise d'eau, permettra de faire passer dans le tunnel cinq trains montants consécutifs, ce qui sera rarement nécessaire.

Sans doute la chûte de 150 mètres qui a servi de point de départ à notre calcul est une limite qu'il est préférable de ne pas atteindre: mais l'on pourra presque toujours disposer de volumes d'eau de plus de 315 litres par seconde et réduire par conséquent la chûte au chiffre très pratique de 80 ou 100 mètres.

Les dessins de la planche I ont même été établis dans l'hypothèse d'une chûte de 56.50 mètres seulement, et d'un débit de 4.42 mètres pendant l'ascension des trains.

La cloche a 75 mètres carrés de surface utile, une course totale de $2^{m}.77$ et une course utile de $2^{m}.42$ qui se réduit à $2^{m}.20$ par suite des pertes dont il a été question.

Chaque double course dure six secondes et produit 165 mètres d'air comprimé, soit $27^{m}.50$ par seconde en moyenne: quatre cloches doivent donc marcher à la fois pour fournir 110 mètres cubes nécessaires à la propulsion d'un convoi. Le poids de chacune des cloches est d'environ 100 tonnes; enfin le cylindre de la machine à colonne d'eau a un diamètre de $1^{m}.75$

et une section de $2^m.39$: ces proportions peuvent, on le conçoit, varier à l'infini.

Des appareils en tout semblables à ceux qui viennent d'être décrits pourraient servir à la production du vide, dans le cas où l'on devrait placer les machines soufflantes à la partie supérieure des plans inclinés; la seule modification à y introduire serait de changer le sens de l'ouverture des clapets: il serait même facile de construire des clapets renversables, c'est-à-dire s'ouvrant à volonté dans un sens ou dans l'autre: cette disposition serait fort commode si l'on avait à desservir deux plans inclinés successifs séparés par un court palier (tel serait le cas du S.t Bernardino). La même machine pourrait alors aspirer le train sur la rampe inférieure et le refouler ensuite sur la rampe supérieure: comme chaque passage exigera une installation spéciale, il est inutile de s'étendre sur des dispositions qui ne seront peut-être jamais appliquées: bornons-nous à constater que la propulsion atmosphérique présente les ressources les plus variées, et que toute force hydraulique naturelle existant en un point quelconque du parcours du tube, pourra être convenablement utilisée au refoulement des trains.

Il a été question, au début de cette note, de l'emploi de deux tubes accolés permettant d'utiliser la colonne d'air, refoulée par la descente d'un train, à la remonte d'un autre train. Les formules précédemment développées permettraient de faire

d'une manière précise tous les calculs relatifs à ce système spécial, mais nous ne croyons pas devoir nous y arrêter: cette solution fort coûteuse ne serait admissible que dans l'hypothèse malheureusement invraisemblable, où l'importance du trafic nécessiterait la pose d'une deuxième voie sur toute la traversée des Alpes: la construction d'un double tube étant alors obligée, il serait logique d'en tirer tout le parti possible.

Mais en dehors de ce cas tout exceptionnel, cette disposition nous parait devoir être repoussée: dans l'exemple emprunté au passage du Splügen le train descendant parcourrait plus d'un kilomètre avant de mettre en mouvement le train montant: en outre la vitesse de 5m.00 du premier convoi ne se communiquerait pas tout entière au second, et se réduirait par les fuites à 3m.20: ainsi quand l'un des trains serait arrivé au bas de sa course, l'autre n'aurait parcouru tout au plus que 4 kilomètres et demi; l'intervention des machines soufflantes serait donc nécessaire pour près de la moitié du voyage. Enfin un train de 200 tonnes ne pourrait être refoulé que par un convoi d'au moins 250 tonnes, ce qui serait en pratique la source de nombreux inconvénients.

Cet expédient serait cependant digne de considération, si la propulsion ne pouvait être obtenue que par des machines à vapeur; mais ce cas ne se présentera que très-rarement, et lorsqu'on aura convenablement aménagé les chûtes d'eau

qui ne manqueront jamais en aucune saison dans les Alpes, il importera assez peu de mettre en marche les machines soufflantes, ou de les laisser en repos: les frais seront sensiblement indépendants du nombre de trains journellement refoulés, et l'on n'aura aucun motif de faire la dépense trés-considérable d'un deuxième tube, dépense qu'un énorme trafic pourrait seule justifier.

Nous croyons avoir passé en revue, dans le cours de cette étude, toutes les objections qui peuvent être faites au système pneumatique, et nous espérons avoir démontré que ce système ne présente ni impossibilité, ni difficulté sérieuse d'application.

Cette solution nous paraît indiquée par la nature même du problème à résoudre, car tout chemin de fer s'élevant dans les montagnes à une grande hauteur doit forcément être recouvert par des toitures en tôle et même par des voûtes en maçonnerie: dès lors n'est-ils pas logique d'utiliser des travaux en tout cas indispensables, à la transmission de la force motrice par le moyen de l'air comprimé ? de profiter, en d'autres termes, de la nécessité impérieuse de protéger le chemin contre les neiges et les chûtes de rochers, pour résoudre sans surcroît de dépense appréciable, le problème tant étudié de la traction sur les fortes pentes ?

Nous ne prétendons pas certainement que l'adoption du système atmosphérique supprime tou-

tes les difficultés des passages des grandes chaînes: mais nous croyons fermement qu'avec le système des grands tunnels, la traversée des Alpes Helvétiques est une mauvaise opération au point de vue économique; que les avantages très-réels qu'en retireront l'Italie, la Suisse et les pays limitrophes ne correspondront pas à l'énormité de la dépense : que le système pneumatique au contraire, permet d'aborder cette grande entreprise avec quelque chance de bénéfice.

Il ne saurait entrer dans notre cadre d'établir un parallèle entre la valeur respective des passages du S.t Gothard, du Luckmanier, du S.t Bernardino et du Splügen, au point de vue du système qui nous occupe; nous nous bornerons à donner *(Planches* II *et* III) les profils de ces quatre traversées, afin de faire voir qu'elles sont toutes, sinon également faciles, du moins parfaitement exécutables, et nous laisserons à des juges plus compétents le soin de faire un choix entre elles.

Nous dirons seulement quelques mots de la traversée du Splügen qui se prête à l'une des meilleures applications du système atmosphérique.

La ligne dont le profil est représenté, planche III, n'offre aucune difficulté jusqu'à Chiavenna, où l'on rencontre un premier tube de 9 kilomètres de longueur, en rampe de $0^m.08$ par mètre; à ce tube succède un court tronçon de cinq kilomètres destiné à être exploité par

deux locomotives faisant la navette: puis vient un deuxième tube de huit kilomètres de longueur, avec pente de 0,095 par mètre, qui débouche à la cote 1860; parvenue à ce point culminant, où recommence la traction par locomotives, la ligne entre en tunnel sur une longueur de 3500 mètres, en se tenant è 250 mètres environ sous le niveau du col: ce souterrain est du reste entièrement exécutable avec des puits de 180 à 200 mètres de profondeur maximum: au sortir de cette galerie, le tracé descend au village de Splügen, sans dépasser la pente de 0.0193 par mètre, au moyen d'un développement dans la vallée du Rhin; il continue à suivre cette vallée jusqu'à la chûte de la Roffna, rachetée par un tube de cinq kilométres de longueur et de 80 millièmes d'inclinaison, pour aboutir enfin à Coire après avoir longé la Via Mala.

On voit que dans ce projet, comme dans ceux du S.t Gothard, du Luckmanier et du S.t Bernardino, les tubes ont été morcelés et employés avec modération: on aurait pu, en les appliquant sur une plus large échelle, éviter le souterrain du faîte, et redescendre au village de Splügen avec une économie de parcours de 12 kilomètres; mais on a craint de pousser le système jusqu' à l'abus, et l'on a préféré se servir de la locomotive partout où cela était possible; sans doute ce mode de traction ne dispensera pas le constructeur de couvrir le che-

min dans ses parties les plus élevées; mais comme les pentes ne dépasseront nulle part 0m.020 par mètre, l'exploitation se fera dans de bonnes conditions.

Les trois groupes de machines soufflantes qui devront être établis au pied des tubes, trouveront toute l'année une force motrice suffisante dans les chûtes d'eau de la vallée du Rhin et de celle du Liro: il est superflu de le démontrer en ce qui concerne la Roffna, où la chûte du Rhin ne représente pas une force de moins de 30 000 à 40 000 chevaux. Quant au torrent du Liro, nous croyons que son débit peut quelquefois tomber à un demi mètre cube par seconde, peut-être même plus bas encore à la suite de froids prolongés; mais la vallée de S. Giacomo présente plusieurs paliers où il serait facile d'établir à très peu de frais d'immenses réservoirs, capables de fournir pendant un ou deux mois la force nécessaire à la remonte des convois; on pourrait donc sur le versant Italien, comme du côté de la Suisse, éviter l'expédient fort coûteux de machines à vapeur de réserve, destinées à remplacer pendant l'hiver les machines à colonne d'eau.

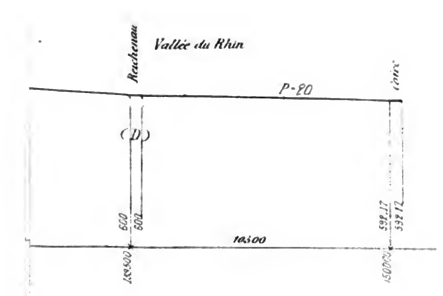
Turin, Octobre 1868.



90

Planche N° II. 90 P

Echelle = 0,005 par Kilom pour les longheurs
- idem - = 0,050 - idem - pour les hauteurs.



90 e


MC